



CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DA SEPARAÇÃO GÁS-LÍQUIDO EM UMA JUNÇÃO DO TIPO T INCLINADA

Yasmin Soares Gavioli

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientadores: Juliana Braga Rodrigues

Loureiro

Atila Pantaleão Silva Freire

Rio de Janeiro
Outubro de 2017

CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DA SEPARAÇÃO GÁS-LÍQUIDO EM
UMA JUNÇÃO DO TIPO T INCLINADA

Yasmin Soares Gavioli

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO
ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE
ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE
JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA
MECÂNICA.

Examinada por:

Profa. Juliana Braga Rodrigues Loureiro, D.Sc.

Prof. Atila Pantaleão Silva Freire, Ph.D.

Prof. Paulo Laranjeira da Cunha Lage, D.Sc.

Prof. Fabio Toshio Kanizawa, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
OUTUBRO DE 2017

Gavioli, Yasmin Soares

Caracterização experimental da separação gás-líquido em uma junção do tipo T inclinada/Yasmin Soares Gavioli.
– Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2017.

XIX, 126 p.: il.; 29,7cm.

Orientadores: Juliana Braga Rodrigues Loureiro

Atila Pantaleão Silva Freire

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Mecânica, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 103 – 108.

1. Junção do Tipo T. 2. Separação Gás-Líquido.
3. Escoamento Bifásico. I. Loureiro, Juliana Braga Rodrigues *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Mecânica. III. Título.

*Dedico este trabalho a Carlos
Augusto e Vânia, meus pais,
Vitória, minha irmã e Sylvia,
minha avó*

Agradecimentos

Agradeço aos professores e funcionários do Programa de Engenharia Mecânica da COPPE, e aos integrantes do NIDF, em particular à Professora Juliana e ao Professor Átila, pelo apoio e orientação neste trabalho e, principalmente, pela oportunidade de fazer parte do seleto grupo de alunos que passou por este núcleo.

Meu especial agradecimento aos professores Valter Aibe e Daniel Cruz que ajudaram imensamente transmitindo seu vasto conhecimento e auxiliando em todo o processo de forma única.

Agradeço, ainda, aos colegas de curso e de laboratório, pelo pelo companheirismo ao longo desta jornada e pela ajuda com os experimentos, as análises e a dissertação. Em especial, aos amigos Gustavo, Jarmeson, Leonardo, Cecilia, Laert, Alexandre, Daniel, Thaiane, Higuel e Ligia que foram imensamente presentes no meu dia a dia.

Agradeço a toda a minha família e amigos, em especial, agradeço aos meus pais Carlos Augusto e Vânia, a minha irmã Vitória, minha avó Sylvia e Matheus por me encorajarem a permanecer sempre no caminho do conhecimento. Sem vocês não seria possível realizar este trabalho.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DA SEPARAÇÃO GÁS-LÍQUIDO EM UMA JUNÇÃO DO TIPO T INCLINADA

Yasmin Soares Gavioli

Outubro/2017

Orientadores: Juliana Braga Rodrigues Loureiro

Atila Pantaleão Silva Freire

Programa: Engenharia Mecânica

O escoamentos bifásicos em uma junção do tipo T é empregada em muitos processos industriais, tais como as linhas de um campo de petróleo, redes de gasodutos e tubulações de refinaria para dividir ou combinar os escoamentos. Quando uma mistura de gás-líquido flui através de uma junção, as fases podem ser separadas de forma desigual, de tal forma que as concentrações das fases nas pernas jusantes são desconhecidas. Este trabalho está focado na caracterização experimental das propriedades dinâmicas de separação de escoamentos gás-líquido em uma junção do tipo T de inclinação descendente de 10° e um ramal vertical ascendente. O propósito finalístico do trabalho reside em gerar uma base de dados para caracterizar o fenômeno de separação na junção T. O aparato experimental, incluindo a junção T, possui um diâmetro interno de 70 mm (ramal principal) / 50 mm (ramal vertical) e foi construído em acrílico para permitir a visualização do escoamento. Diferentes vazões de água e ar foram utilizadas para simular os padrões de escoamento estratificado e pistonado. Em toda a tubulação foram instalados pontos de medição de pressão, para quantificar a distribuição da pressão local em cada ramal. O perfil de velocidade e a velocidade média foram caracterizados por meio de Velocimetria por Imagem de Partículas (VIP). Um sistema de detecção de imagens por sombras (*Shadow Sizer*) e técnicas baseadas em laser foram usadas para caracterizar as propriedades da fase gasosa, tais como o comprimento e velocidade da bolha.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

EXPERIMENTAL STUDY OF GAS-LIQUID FLOW SEPARATION AT A INCLINED T-JUNCTION

Yasmin Soares Gavioli

October/2017

Advisors: Juliana Braga Rodrigues Loureiro

Atila Pantaleão Silva Freire

Department: Mechanical Engineering

The two-phase flows at a T-Junction is a common feature in many industrial processes, such as oil field flow lines, pipeline networks and refinery streams to divide or combine flows. When a gas-liquid mixture flows through a junction, the phases can be separated unevenly such that the qualities in the downstream legs are unequal. This work is focused on the experimental characterization of the dynamical properties of gas-liquid flow separation in a particular configuration of a T-Junction: inlet pipe inclined 10° downward and a vertical upward branch. The final purpose of this work is to generate a database to characterize the separation phenomenon at T-junction. The experimental apparatus is comprised by the splitting tee test section, which has an internal diameter of 70 mm (principal pipe) / 50 mm (vertical branch) and is made of Perspex to enable visualization studies. Different air and water flow rates were used to simulate stratified smooth and slug flow patterns. The inlet pipe and side branch were pressure-tapped to enable measurement of pressure distribution in each arm. The velocity profile and mean velocity of the liquid phase were characterized by means of Particle Image Velocimetry (PIV). A Shadow Sizer system and laser-based techniques were used to quantify the properties of the gas phase, such as bubble length and bubble velocity.

Sumário

Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xiv
Lista de Símbolos	xvi
Lista de Abreviaturas	xix
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivo do Trabalho	3
2 Fundamentos Teóricos	4
2.1 Escoamentos Multifásicos: algumas definições	4
2.1.1 Fração volumétrica	4
2.1.2 Velocidade superficial da fase	5
2.1.3 Velocidade da fase	5
2.1.4 Velocidade de mistura	5
2.2 Padrões de escoamento	6
2.2.1 Escoamentos bifásicos horizontal	6
2.2.2 Escoamentos bifásicos verticais	8
2.2.3 Escoamentos bifásicos inclinados	10
3 Revisão Bibliográfica	12
3.1 Junção do Tipo T	12
3.1.1 Ensaio de Visualização	14
3.1.2 Modelagem Matemática	15
4 Metodologia Experimental	18
4.1 Descrição do Aparato Experimental	18
4.1.1 Sistema de alimentação de ar e água	21
4.1.2 Sistema de medição de dados	21
4.1.3 Sistema de aquisição de dados	25

4.2	Técnicas para o Balanço de Massa	32
4.2.1	Correção da Vazão de Ar Comprimido	32
4.3	Medição de Pressão	33
4.4	Técnicas de Medição para Visualização de Escoamentos	37
4.4.1	Detecção de contorno por sombras (Shadow Sizing)	37
4.4.2	Velocimetria por Imagem de Partículas	38
4.5	Procedimento Experimental	40
4.5.1	Monofásico	40
4.5.2	Bifásico	41
4.5.3	Operação do Sistema Caixa Separadora - Caixa 1	51
5	Análise de Incertezas	53
5.1	Conceitos Fundamentais	53
5.2	Procedimento de Cálculo de Incertezas	55
5.3	Incerteza da Medição de Vazão de Líquido	57
5.4	Incerteza da Medição de Vazão de Gás	58
5.5	Incerteza da Medição de Temperatura	59
5.6	Incerteza da Medição de Pressão	60
6	Resultados	62
6.1	Monofásico	62
6.1.1	Condições Experimentais	62
6.1.2	Medições de Pressão	62
6.1.3	Medições com PIV	64
6.2	Bifásico	70
6.2.1	Condições Experimentais	70
6.2.2	Medições de Pressão	71
6.2.3	Medições do Balanço Mássico	75
6.2.4	Medições com Shadow Sizer	79
6.2.5	Medições com <i>Shadow Sizing</i> e PIV	84
7	Análise dos Resultados	95
7.1	Fenômeno Intermitente	95
8	Conclusões	100
8.1	Sugestões Trabalhos Futuros	102
	Referências Bibliográficas	103
A	Código para o <i>software</i> MATLAB 2015a	109

B	Parâmetros de Ajuste do PIV	112
B.1	<i>Software Dynamic Studio 2015a</i>	112
B.2	Equipamentos	113
C	Condições Experimentais	114

Lista de Figuras

2.1	Regimes de escoamentos horizontais	7
2.2	Escoamento vertical de gás e líquido ascendente	9
3.1	Especificação dos nomes adotados em uma junção do tipo T. As setas indicam o sentido do escoamento.	12
3.2	Referencial adotado na Tabela 3.1.	14
4.1	Junção do tipo T que será utilizada neste trabalho. As setas indicam o sentido do escoamento.	18
4.2	Visão geral aparato experimental utilizado neste trabalho.	19
4.3	Trechos da junção do tipo T. As setas indicam o sentido do escoamento.	22
4.4	Montagem realizada para os ensaios de <i>Shadow Sizing</i>	23
4.5	Montagem realizada para os ensaios de <i>Shadow Sizing</i> mais PIV.	24
4.6	Programa para aquisição de dados	27
4.7	Programa para aquisição de dados de pressão diferencial	28
4.8	Componentes de medição de dados no Trecho 3.	29
4.9	Painel Frontal da caixa controladora.	30
4.10	Painel frontal da caixa de sensor.	30
4.11	Geometria do Sensor 1.	31
4.12	Tomadas de pressão no trecho inclinado.	34
4.13	Tomadas de pressão no trecho horizontal.	35
4.14	Tomadas de pressão na junção T.	36
4.15	Tomadas de pressão do aparato experimental.	36
4.16	Esquema do princípio de funcionamento da técnica <i>Shadow Sizing</i>	38
4.17	Esquema do princípio de funcionamento da técnica PIV	39
4.18	Parâmetros utilizados no processamento das imagens de PIV - <i>Adaptive PIV</i>	41
4.19	Posições dos perfis de velocidade para o estudo monofásico	42
4.20	Região de interesse da análise de <i>Shadow Sizer</i> - fase não separada.	44
4.21	Exemplo da etapa inicial do processamento.	44
4.22	Exemplo da etapa final do processamento.	45

4.23	Padrões de Escoamento antes da junção T para os ensaios de visualização. Sendo (a) Caso 1, (b) Caso 2, (c) Caso 3, (d) Caso 4 e (e) Caso 5.	48
4.24	Padrões de Escoamento antes da junção T para os ensaios de visualização. Sendo (a) Caso 6, (b) Caso 7, (c) Caso 8 e (d) Caso 9.	49
4.25	Perfil de escoamento próximo a junção T para os casos de 1 a 5.	50
4.26	Perfil de escoamento próximo a junção T para os casos de 6 a 9	50
4.27	Exemplo da combinação da técnica de <i>Shadow Sizing</i> mais PIV.	51
6.1	Desenho esquemático com coordenadas e referenciais de comprimento adotados	63
6.2	Distribuição da pressão no aparato experimental	63
6.3	Perda de carga nas proximidades da junção T	64
6.4	Comparação dos perfis do modelo teórico com o experimental	65
6.5	Campo de velocidade na junção T para $Q_{L1}=11m^3/h$	66
6.6	Linhas de tendência na junção T para $Q_{L1}=11m^3/h$	66
6.7	Perfis de velocidade ao longo do trecho inclinado na Junção T.	67
6.8	Diferença dos Perfis de Velocidade para Escoamento Monofásico na Junção T	68
6.9	Campo de velocidade na perna vertical da junção T	68
6.10	Campo de velocidade e linhas de corrente na perna vertical da junção T	69
6.11	Diferencial de pressão ao longo da junção	73
6.12	Diferencial de pressão ao longo da junção.	73
6.13	Diferencial de pressão antes e depois da junção avaliando a separação das fases.	74
6.14	Diferencial de pressão antes e depois da junção para razões de separação de gás distintas.	75
6.15	Comparação entre as vazões de gás variando a vazão de líquido na entrada.	76
6.16	Comparação entre as vazões de gás na entrada e na saída vertical da junção do tipo T.	76
6.17	Comparação entre as vazões de gás na entrada e na saída vertical da junção do tipo T fixando as vazões de gás.	77
6.18	Comparação entre as vazões de gás na entrada e na saída vertical da junção do tipo T fixando as vazões de líquido.	77
6.19	Comparação entre as vazões de gás na entrada e na saída vertical da junção do tipo T para uma mesma razão fluidos de entrada.	78
6.20	Variação da densidade média.	78
6.21	Diâmetros equivalentes da análise de <i>Shadow Sizing</i>	80

6.22	Referencial adotado para os ensaios bifásicos de <i>Shadow Sizing</i>	80
6.23	Velocidades das bolhas não separadas para uma mesma vazão de gás.	81
6.24	Velocidades das bolhas não separadas para uma mesma vazão de líquido.	81
6.25	Exemplo da recirculação presente logo após a junção T ($Q_{L1} = 11,2m^3/h$ e $Q_{G1} = 0,13m^3/h$). Intervalo de tempo entre as imagens de 0,022 segundos.	82
6.26	Avaliação das bolhas não separadas pela junção. $Q_{L1} = 11,2m^3/h$ e $Q_{G1} = 0,13m^3/h$, intervalo entre as imagens de 0,011 segundos.	83
6.27	Exemplo da sombra formada no trecho da perna vertical ($Q_{L1} = 13,7m^3/h$ e $Q_{G1} = 0,13m^3/h$).	85
6.28	Caso 1 ($Q_{L1} = 6,0m^3/h$ e $Q_{G1} = 0,13m^3/h$).	86
6.29	Caso 2 ($Q_{L1} = 8,0m^3/h$ e $Q_{G1} = 0,13m^3/h$).	86
6.30	Caso 3/7 ($Q_{L1} = 10,1m^3/h$ e $Q_{G1} = 0,13m^3/h$).	86
6.31	Caso 8 ($Q_{L1} = 10,1m^3/h$ e $Q_{G1} = 0,20m^3/h$).	87
6.32	Caso 9 ($Q_{L1} = 10,1m^3/h$ e $Q_{G1} = 0,27m^3/h$).	87
6.33	Caso 4 ($Q_{L1} = 11,2m^3/h$ e $Q_{G1} = 0,13m^3/h$).	88
6.34	Caso 5 ($Q_{L1} = 13,7m^3/h$ e $Q_{G1} = 0,13m^3/h$).	88
6.35	Caso 6 ($Q_{L1} = 10,1m^3/h$ e $Q_{G1} = 0,07m^3/h$).	89
6.36	Exemplo do campo de velocidade instantâneo para a passagem de uma bolha ($Q_{L1} = 11,2m^3/h$ e $Q_{G1} = 0,13m^3/h$).	90
6.37	Exemplo do campo de velocidade instantâneo para a passagem de uma bolha ($Q_{L1} = 13,7m^3/h$ e $Q_{G1} = 0,13m^3/h$).	91
6.38	Região de recirculação após a junção T. $Q_{L1} = 11,2m^3/h$ e $Q_{G1} = 0,13m^3/h$, intervalo entre as imagens de 0,067 segundos.	91
6.39	Avaliação da recirculação no trecho 2. $Q_{L1} = 11,2m^3/h$ e $Q_{G1} = 0,13m^3/h$	92
6.40	Perfis de velocidade para estudo bifásico.	92
6.41	Perfis de velocidade para os casos 1, 2 e 3/7.	93
6.42	Perfis de velocidade para os casos 8 e 9.	93
6.43	Perfis de velocidade para os casos 4, 5 e 6.	94
7.1	Exemplo de bolha retornando para a junção T, $Q_{L1} = 6,0m^3/h$ e $Q_{G1} = 0,13m^3/h$	96
7.2	Oscilação de pressão na tubulação inclinada devido ao fenômeno transiente.	97
7.3	Fenômeno observado na entrada do aparato para vazões de $Q_{L1} = 6,0m^3/h$ e $Q_{G1} = 0,13m^3/h$	98
7.4	Exemplo de pistão de líquido chegando na junção, $Q_{L1} = 6,0m^3/h$ e $Q_{G1} = 0,13m^3/h$	99

Lista de Tabelas

3.1	Resumo de trabalhos sobre junção do tipo T	14
4.1	Parâmetros adotados nos ensaios de <i>Shadow Sizing</i>	47
4.2	Caracterização do Padrão de Escoamento para Ensaios de visualização 49	
5.1	Valor de k em função do valor de ν_{eff} calculado, considerando probabilidade de abrangência de 95,45%	56
5.2	Demonstrativo do cálculo de incertezas para as medições de vazão de líquido utilizadas no ensaios de balanço mássico.	57
5.3	Demonstrativo do cálculo de incertezas para as medições de vazão de líquido utilizadas no ensaios de visualização.	58
5.4	Incerteza para as medições de gás com medidor Vórtex - Trecho 1. . .	58
5.5	Incerteza para as medições de gás com medidor rotâmetro - Trecho 1.	59
5.6	Incerteza para as medições de gás com medidor Diafragma - Trecho 3.	59
5.7	Demonstrativo do cálculo de incertezas para as medições de temperatura.	60
5.8	Incerteza para a medição de pressão absoluta na entrada de gás. . . .	60
5.9	Incerteza para a medição de pressão absoluta na caixa 1.	60
5.10	Incerteza para a medição de pressão absoluta na tubulação.	61
5.11	Incerteza para a medição de pressão diferencial da tubulação.	61
5.12	Incerteza para a medição de pressão diferencial da junção T.	61
6.1	Distâncias dos perfis de velocidade na Junção T	66
6.2	Parâmetros adotados nos Ensaios de Balanço Mássico sem saída de Líquido pelo trecho 3.	70
6.3	Parâmetros adotados nos Ensaios de Balanço Mássico com saída de Líquido pelo trecho 3 - Parte 1.	71
6.4	Parâmetros adotados nos Ensaios de Balanço Mássico com saída de Líquido pelo trecho 3 - Parte 2.	72
6.5	Casos utilizados para ensaios de pressão com escoamento bifásico. . .	72
6.6	Caracterização da Bolha	84

C.1	Condições Experimentais utilizadas nos ensaios de visualização. . . .	115
C.1	Condições Experimentais utilizadas nos ensaios de visualização. . . .	116
C.2	Condições experimentais utilizadas nos ensaios de balanço mássico e pressão.	117
C.2	Condições experimentais utilizadas nos ensaios de balanço mássico e pressão.	118
C.2	Condições experimentais utilizadas nos ensaios de balanço mássico e pressão.	119
C.2	Condições experimentais utilizadas nos ensaios de balanço mássico e pressão.	120
C.2	Condições experimentais utilizadas nos ensaios de balanço mássico e pressão.	121
C.3	Dados obtidos para os trechos 2 e 3 nos ensaios de balanço mássico e pressão.	122
C.3	Dados obtidos para os trechos 2 e 3 nos ensaios de balanço mássico e pressão.	123
C.3	Dados obtidos para os trechos 2 e 3 nos ensaios de balanço mássico e pressão.	124
C.3	Dados obtidos para os trechos 2 e 3 nos ensaios de balanço mássico e pressão.	125
C.3	Dados obtidos para os trechos 2 e 3 nos ensaios de balanço mássico e pressão.	126

Lista de Símbolos

$(\Delta p_{1-i})_{irr}$	Diferença de pressão irreversível entre o ramo da entrada e outra parte da junção, p. 15
$(\Delta p_{1-i})_{rev}$	Diferença de pressão reversível entre o ramo da entrada e outra parte da junção, p. 15
A_T	Área total da seção transversal da tubulação, p. 5
A_i	Área da seção transversal do duto ocupada pela fase i, p. 5
C_i	Coefficiente de sensibilidade, p. 55
D_{ext}	Diâmetro interno do tubo do ramal, p. 13
D_{in}	Diâmetro interno do tubo da entrada, p. 13
G_i	Fluxo de massa no trecho da junção i, p. 16
K_{1i}	coeficientes de perda dependentes da razão do fluxo de massa, p. 16
N	Número de grandezas de influência, p. 55
P_i	Pressão no ponto i da tubulação, p. 37
P_{ar}	Pressão do ar no medidor de entrada, p. 32
P_{atm}	Pressão atmosférica, p. 33
P_{tub}	Pressão na tubulação, p. 32
Q_{G_i}	Vazão volumétrica da fase gasosa no trecho i, p. 71
$Q_{G_{inst}}$	Vazão instantânea de gás, p. 58
$Q_{G_{med}}$	Vazão de gás medida, p. 32
Q_{L_i}	Vazão volumétrica da fase líquida no trecho i, p. 71

Q_i	Vazão volumétrica da fase i, p. 5
T_{ar}	Temperatura do ar no medidor de entrada, p. 32
T_{tub}	Temperatura na tubulação, p. 32
U	Incerteza expandida, p. 56
U_b	Velocidade da bolha no eixo y - <i>Shadow Sinzing</i> , p. 80
U_c	Incerteza combinada, p. 55
U_i	Incerteza da grandeza envolvida i , p. 56
V	Volume total, p. 4
V_b	Velocidade da bolha no eixo x - <i>Shadow Sinzing</i> , p. 80
V_0	Volume limite para obter valor representativo, p. 4
V_i	Volume ocupado pela fase i no volume total, p. 4
W_i	Vazão mássica no trecho da junção i, p. 16, 17
X_i	Grandeza envolvida no cálculo de incerteza, p. 55
ΔL	Distância entre pontos da tubulação, p. 37
Δp_{1-2}	Diferença de pressão entre o ramo da entrada e o de saída, p. 15
Δp_{1-3}	Diferença de pressão entre o ramo da entrada e o lateral, p. 15
Δp_{1-i}	Diferença de pressão entre o ramo da entrada e outra parte da junção, p. 15
α_G	Fração volumétrica da fase gasosa, p. 5
α_L	Fração volumétrica da fase líquida, p. 5
$\bar{\sigma}$	Desvio padrão, p. 56
β	Ângulo de inclinação do tubo do ramal, p. 13
ν_i	Graus de liberdade do fator de incerteza, p. 56
ν_{eff}	Grau de liberdade efetiva, p. 55
ρ_G	Densidade da fase gasosa, p. 17

ρ_L	Densidade da fase líquida, p. 17
ρ_i	Densidade da mistura no trecho i, p. 16
θ	Ângulo de inclinação do tubo da entrada, p. 13
f_{Q_G}	fator de correção da vazão volumétrica de ar, p. 33
f_{mc}	Fator de correção referente a calibração, p. 57
g	Gravidade, p. 37
$k_{(1-2)_S}$	Coeficiente relacionado ao momento axial, p. 16
s_i	receptor do sensor de nível, p. 31
u_{GS}	Velocidade superficial da fase gasosa, p. 6
u_{LS}	Velocidade superficial da fase líquida, p. 6
u_{Lmax}	Velocidade máxima da fase líquida, p. 41
u_{Ly}	Velocidade da fase líquida na posição y, p. 41
u_{iS}	Velocidade superficial da fase i, p. 5
u_i	Velocidade da fase i, p. 5
u_m	Velocidade média da mistura, p. 5
x_1	Título do escoamento no trecho da junção i, p. 16
y	Distância da parede da tubulação, p. 41
$\bar{\sigma}^2$	Variância, p. 56
R	Raio da tubulação, p. 41
Ve	Válvula esfera de PVC, p. 29
α_i	Fração Volumétrica de uma fase I, p. 4
k	Fator de abrangência, p. 55

Lista de Abreviaturas

LED	<i>Light Emitting Diode</i> , p. 38
NIDF	Núcleo Interdisciplinar de Dinâmica dos Fluidos, p. 18
PIV	Particle Image Velocimetry, p. 37

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

Ao longo da vida produtiva de um campo de petróleo, frações distintas de óleo, água, gás e sedimentos são produzidos simultaneamente. Porém, como o propósito da indústria reside somente na produção de hidrocarbonetos (óleo e gás), faz-se necessário a utilização de mecanismos de separação de fases distintas. Deste modo, pode-se fazer a transferência do óleo e gás e posterior reinjeção e/ou descarte da água e sólidos. A utilização desses mecanismos de separação é conhecida como o processamento primário do petróleo.

O processamento primário de petróleo é a primeira etapa pela qual o petróleo é submetido após a saída do reservatório, ainda em sua fase de produção (DO BRASIL *et al.*, 2000). No passado, o processo de separação era tipicamente realizado nas plataformas, ou em terra, através da utilização de grandes vasos separadores, onde o escoamento multifásico permanece em repouso por um dado intervalo de tempo, para assim, a separação ocorrer por ação da força da gravidade.

Novas estratégias de processamento estão sendo investigadas com o intuito de promover a separação em tempo real. Este objetivo é alcançado através do uso de equipamentos compactos e mais leves, nos quais o tempo de residência do fluido é significativamente menor em comparação aos tanques gravimétricos. Essas novas soluções são usualmente baseadas no efeito ciclônico, que maximiza a separação através do efeito de forças centrífugas em pequenos equipamentos cilíndricos. Outra solução tecnológica é baseada na potencialização do efeito gravitacional através de um conjunto de tubulações e junções do tipo T. Denominados genericamente de separadores tubulares, estes equipamentos podem ser confeccionados em geometrias verticais, horizontais ou inclinadas. Por ser muito complexo o escoamento bifásico no interior destes separadores, o dimensionamento destes equipamentos é feito essencialmente de modo empírico, como relatado por WREN e AZZOPARDI (2004),

além de BAKER *et al.* (2007).

Quando o escoamento bifásico gás-líquido entra em uma junção do tipo T, as fases tendem a se dividir entre o ramal lateral e o duto principal. Dificilmente a separação será uniforme, com divisão de fases em quantidades iguais. Dependendo das condições de entrada, a fase líquida pode escoar ou não pelo ramal lateral. Como resultado dessa não uniformidade, há uma mudança na composição das fases em relação à entrada da junção e, portanto, uma mudança dos padrões do escoamento nos ramais lateral e principal, observado nos estudos de SHOAM *et al.* (1987) e REIS (2003). Diferentes padrões de escoamento na entrada da junção e diferentes geometrias adotadas afetam a separação. Logo, é de grande importância o seu estudo para conhecer o mecanismo de distribuições das fases para diferentes geometrias.

Neste contexto, o objetivo desta dissertação de mestrado está focado na caracterização experimental das propriedades dinâmicas de separação de escoamentos gás-líquido em uma junção do tipo T de inclinação de 10° . O aparato experimental, incluindo a junção T, possui um diâmetro interno de 70 mm (ramal principal) / 50 mm (ramal vertical) e foi construído em acrílico para permitir a visualização do escoamento. A escolha desta geometria específica foi baseada no protótipo de um separador gravitacional multitubular para águas profundas instalado no Laboratório de Separadores Compactos do NIDF - Núcleo Interdisciplinar de Dinâmica dos Fluidos.

Diferentes casos de vazões de água e ar foram utilizados para simular os padrões de escoamento estratificado e pistonado. Em toda a tubulação foram instalados pontos de medição de pressão, para quantificar a distribuição da pressão local em cada ramal. Ensaio de visualização, Velocimetria por Imagem de Partículas (VIP) e um sistema de detecção de imagens por sombras (*Shadow Sizer*) combinado a técnicas baseadas em laser, foram utilizados para a caracterização da fase líquida e gasosa, respectivamente.

O mecanismo de separação de fases em uma junção do tipo T é regido por efeitos de inércia, gravidade e empuxo. As fases observadas nas tubulações de saída dependem, portanto, das vazões de gás e líquido na entrada, das massas específicas e viscosidades das fases, da tensão superficial, do padrão do escoamento na entrada. Naturalmente, parâmetros geométricos como os diâmetros da entrada e dos ramais principal e lateral, o ângulo de conexão entre o ramal lateral e o tubo principal, o ângulo de inclinação entre os ramais principal e lateral também influenciam a distribuição de fases nos tubos de saída. Este grande número de variáveis faz com que o fenômeno de separação de fases em um T seja ainda pouco compreendido. De fato, este é um problema desafiador, tanto sob o aspecto da descrição fundamental do problema quanto de sua aplicação industrial. Como efeito, a correta modelagem do fenômeno de separação nos permite, a partir de primeiros princípios, projetar

separadores mais eficientes e robustos, assim então, prever com segurança seu desempenho para diferentes condições de aplicação.

1.2 Objetivo do Trabalho

O objetivo deste trabalho reside em observar e descrever o fenômeno da separação bifásica em uma junção T, para diferentes vazões de gás e líquido, considerando um ângulo de inclinação de 10 graus. Os resultados obtidos a partir deste estudo serão utilizados futuramente para o desenvolvimento e validação de um modelo simplificado que permitirá projetar, com embasamento teórico, separadores tubulares para escoamentos gás-líquido. O modelo físico simplificado também será capaz de prever o desempenho do separador a partir de dados de vazão e pressão de operação.

O aparato experimental consiste em simular, em condições controladas e com alta repetibilidade, um escoamento turbulento bifásico gás-líquido em tubulação. A configuração investigada é constituída de uma ramificação lateral mantida na mesma posição vertical ascendente, o tubo de entrada é inclinado a 10° de forma a gerar um escoamento descendente.

Construído para o presente estudo, este aparato experimental opera em circuito fechado. Medições globais de vazão, queda de pressão e fração de gás serão realizadas. O comportamento transiente do escoamento foi quantificado por meio de medições de pressão e massa específica. Os experimentos foram realizados no Núcleo Interdisciplinar de Dinâmica dos Fluidos da COPPE-UFRJ (NIDF). A velocidade média e o perfil de velocidade foram caracterizados por meio de Velocimetria por Imagem de Partículas (VIP). Um sistema de detecção de imagens por sombras (*Shadow Sizer*) e técnicas baseadas em laser serão usadas para caracterizar as propriedades da fase gasosa, tais como o comprimento da bolha, a velocidade e a frequência do pistão.

Depois de uma revisão da literatura, nenhuma análise de junção do tipo T semelhante à investigada neste trabalho foi encontrada. Este estudo visa à compreensão dos mecanismos de separação, a fim de maximizar a separação de gás, sendo uma contribuição relevante tanto sob o aspecto fundamental quanto aplicado.

Capítulo 2

Fundamentos Teóricos

2.1 Escoamentos Multifásicos: algumas definições

Escoamento multifásico é definido como sendo o escoamento simultâneo de dois ou mais fluidos imiscíveis por uma tubulação. De forma geral, estão presentes em muitos dos processos industriais, como nas áreas de alimentos, química, petroquímica e, principalmente, na de produção e transporte de hidrocarbonetos (FOX *et al.*, 2000). Diversos estudos foram realizados no intuito de desenvolver correlações empíricas e modelos mecanicistas que, quando aplicados a este tipo de escoamento, são capazes de prever o perfil de pressão e os regimes de escoamento.

Para os escoamentos bifásicos são descritas uma gama de configurações que mostram a distribuição de uma fase em relação a outra, as quais dependem da razão gás-líquido, da velocidade de cada uma das fases e da orientação da tubulação. De acordo com a orientação da tubulação um escoamento pode ser horizontal, inclinado ou vertical. Neste trabalho, serão analisados escoamentos bifásicos (líquido e gás) em trechos de tubulações horizontais, verticais e inclinados. Por este motivo, os conceitos fundamentais envolvidos no problema de junções do tipo T são descritos abaixo.

2.1.1 Fração volumétrica

A fração volumétrica de uma fase i , α_i , pode ser definida pela equação:

$$\alpha = \lim_{\delta V \rightarrow V_0} \frac{\delta V_i}{\delta V}, \quad (2.1)$$

onde V_i é o volume ocupado pela fase no volume total V . O volume V_0 é o volume limite para obter um valor representativo do ponto. No caso de um escoamento bifásico gás-líquido, obtemos por definição a seguinte identidade:

$$\alpha_G + \alpha_L = 1, \quad (2.2)$$

onde α_G e α_L são as frações volumétricas do gás e do líquido, respectivamente.

Para escoamento em tubulação, as frações das fases também podem ser estabelecidas em termos das áreas transversais do duto:

$$\langle \alpha_i \rangle = \frac{A_i}{A_T}, \quad (2.3)$$

onde A_i é a área da seção transversal do duto ocupada pela fase i e A_T é a área total da seção transversal da tubulação. Esse parâmetro pode variar desde zero até um.

2.1.2 Velocidade superficial da fase

A velocidade superficial da fase i (u_{iS}) é a velocidade que a cada fase exibiria se estivesse escoando sozinha no duto (sem a presença de outras fases), ou seja, ocupando toda a seção transversal, conforme seguinte equação:

$$u_{iS} = \frac{Q_i}{A_T}, \quad (2.4)$$

onde Q_i é a vazão volumétrica da fase i e A_T é a área da seção transversal do duto.

As velocidades superficiais são muito utilizadas para a construção de mapas de regimes de escoamento, onde formam as coordenadas principais e em modelagens fenomenológicas, que utilizam correlações de interação entre as fases (WHITE e CORFIELD, 2006).

2.1.3 Velocidade da fase

A velocidade média em área da fase i , u_i é definida pela razão entre a vazão volumétrica de uma determinada fase e a área da seção transversal do duto ocupado pela mesma. É possível, também, expressar este parâmetro através da fração da fase e da velocidade superficial da fase.

$$u_i = \frac{Q_i}{A_i} = \frac{u_{iS}}{\alpha_i}. \quad (2.5)$$

2.1.4 Velocidade de mistura

A velocidade da mistura multifásica é chamada de velocidade de mistura (u_m), que pode ser definida como a soma das velocidades superficiais das fases envolvidas:

$$u_m = u_{GS} + u_{LS} = \frac{Q_G + Q_L}{A_T}. \quad (2.6)$$

onde u_{GS} e u_{LS} são as velocidades superficiais da fase gasosa e da fase líquida.

2.2 Padrões de escoamento

Como abordado anteriormente, quando duas fases coexistem em um duto, diferentes regimes ou padrões de escoamento podem surgir. Eles se diferem um do outro pela distribuição espacial da interface de líquido e de gás.

Os regimes podem ser divididos em três categorias, conforme a direção de deslocamento do fluido: escoamento vertical, escoamento horizontal e escoamento inclinado.

Não existe uma única teoria ou correlação capaz de prever com precisão adequada as propriedades de qualquer escoamento bifásico. Os padrões de escoamento são definidos por superfícies locais e balanços de forças de campo no interior de cada fase e entre elas. Porém, essas forças dependem de parâmetros associados (VENZON, 1996):

- Ao escoamento: velocidade das fases, frações de cada fase;
- As propriedades dos fluidos: viscosidade, densidade, etc;
- O estado do fluido: pressão e temperatura;
- Fatores geométricos: diâmetro, inclinação, isolamento e rugosidade interna do duto;
- Variações de propriedades dos fluidos e do escoamento espacialmente e temporalmente através da seção transversal do duto;

A transição entre cada regime ocorre devido à variação de um ou mais parâmetros, desestabilizando o sistema e fazendo com que um novo padrão ocorra. É necessário modelar cada regime de forma específica, levando em conta os fenômenos relevantes em cada caso.

Não há um consenso entre os autores sobre as classificações de regimes de escoamento. De forma geral, os principais regimes para escoamentos horizontais, verticais e inclinados, identificados na literatura são descritos a seguir.

2.2.1 Escoamentos bifásicos horizontal

Baseado na classificação proposta por MANDHANE *et al.* (1974), conforme ilustrada na Figura 2.1, os regimes de escoamento horizontal podem ser classificados em seis tipos, cada um deles está com sua descrição apropriada a seguir.

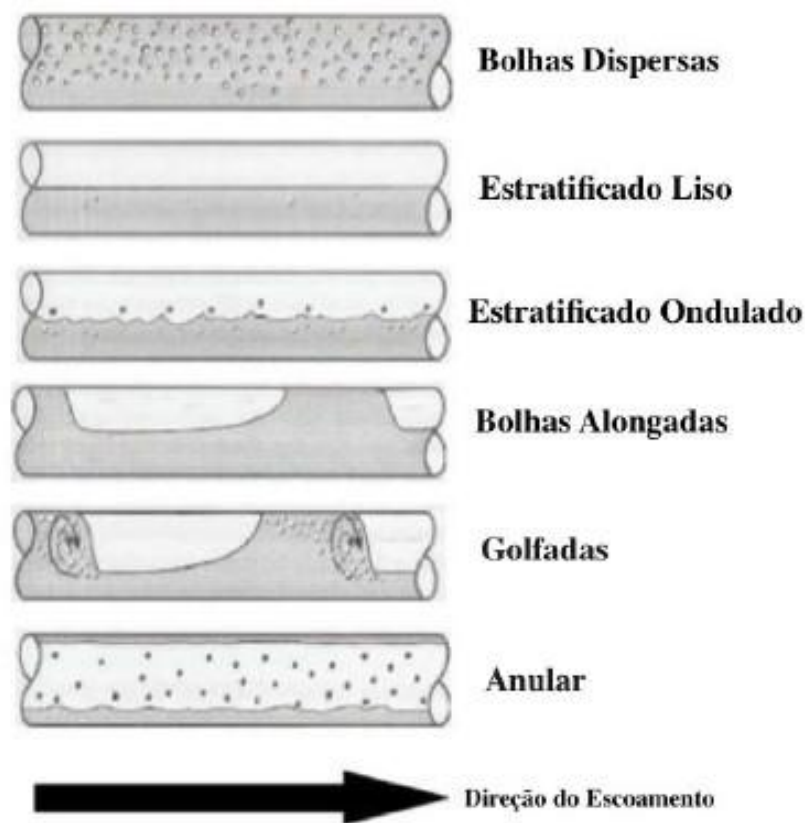


Figura 2.1: Regimes de escoamentos horizontais adaptado de CARNEIRO (2006).

Bolhas dispersas

Conhecido também como escoamento em bolhas, esse escoamento apresenta velocidades muito altas do líquido e baixa relação gás/líquido, quanto maior a velocidade do líquido, menores e mais dispersas ficam as bolhas.

A fase líquida ocupa todo o duto, e bolhas de gás de tamanhos variados (pequenas) se encontram dispersas em toda a seção transversal. Devido à densidade menor do gás, as bolhas tendem a fluir na parte superior do duto.

Escoamento estratificado liso

Ocorre quando a fase líquida e a gasosa apresentam baixas velocidades. As duas fases são separadas por uma interface suave, na qual a fase líquida ocupa a parte inferior da tubulação e a fase gasosa a superior.

Escoamento estratificado ondulado

O escoamento estratificado ondulado também apresenta baixas velocidades de líquido e gás, porém a velocidade da fase gasosa é maior do que no escoamento estratificado liso. Agora, as duas fases são separadas por uma interface ondulada,

apresentando perturbações, sem tocar na parte superior do duto.

Escoamento de bolhas alongadas

No escoamento de bolhas alongadas ou pistonado, devido ao aumento da velocidade do escoamento, ocorre a formação de tampões ou pistões de líquido, também chamados de golfadas de líquido não aerados. Assim, o escoamento é caracterizado pela alternância entre esses pistões e bolhas longas ocupando a parte superior do duto.

Escoamento em golfadas

O escoamento em golfadas, também conhecido como escoamento pistonado, ocorre para velocidades um pouco mais altas de líquido do que no escoamento de bolhas alongadas. O aumento da velocidade do escoamento promove a formação de pistões de líquido que conseguem tocar na parte superior do duto, assim, separando duas grandes bolhas de gás (similar ao escoamento de bolhas alongadas). A diferença deste escoamento para o visto anteriormente, é que as zonas de gás concentram uma camada de líquido estratificado na parte inferior do duto.

Escoamento anular

O escoamento anular apresenta velocidades da fase gasosa muito altas, fazendo com que o gás se concentre na parte central do duto, com um filme de líquido estável tocando toda a parede deste, formando um anel. O núcleo de gás pode conter gotículas dispersas.

2.2.2 Escoamentos bifásicos verticais

Os escoamentos bifásicos verticais são caracterizados por uma mistura de gás-líquido escoando em movimento ascendente em um duto vertical. Cada fase fica distribuída axialmente e radialmente de maneiras distintas, assim, caracterizando padrões de escoamentos diferentes de acordo com a velocidade de cada fase, propriedades dos fluidos e geometria da tubulação (SOUZA, 2010).

Como o escoamento é vertical existem duas possibilidades de direção do escoamento, contra a gravidade (ascendente) ou a favor da gravidade (descendente). Quando o escoamento é ascendente, o fluido de menor densidade tem uma flutuabilidade que age como uma força adicional para movê-lo mais rápido, este efeito é o oposto para o fluido mais denso. O fenômeno contrário ocorre com o escoamento descendente. Porém, existem diferentes regimes de escoamento para essas duas situações. A principal razão que faz com que exista essa diferença é que o fluido

de menor densidade é dominado por forças motrizes de pressão, enquanto o mais pesado sofre maior efeito gravitacional (DA CAMARA MONTEIRO, 2014).

Para exemplificar os escoamentos ascendentes de líquido e gás, foram escolhidos os quatro padrões tradicionais de escoamentos verticais contra gravidade, conforme ilustrados pela Figura 2.2.

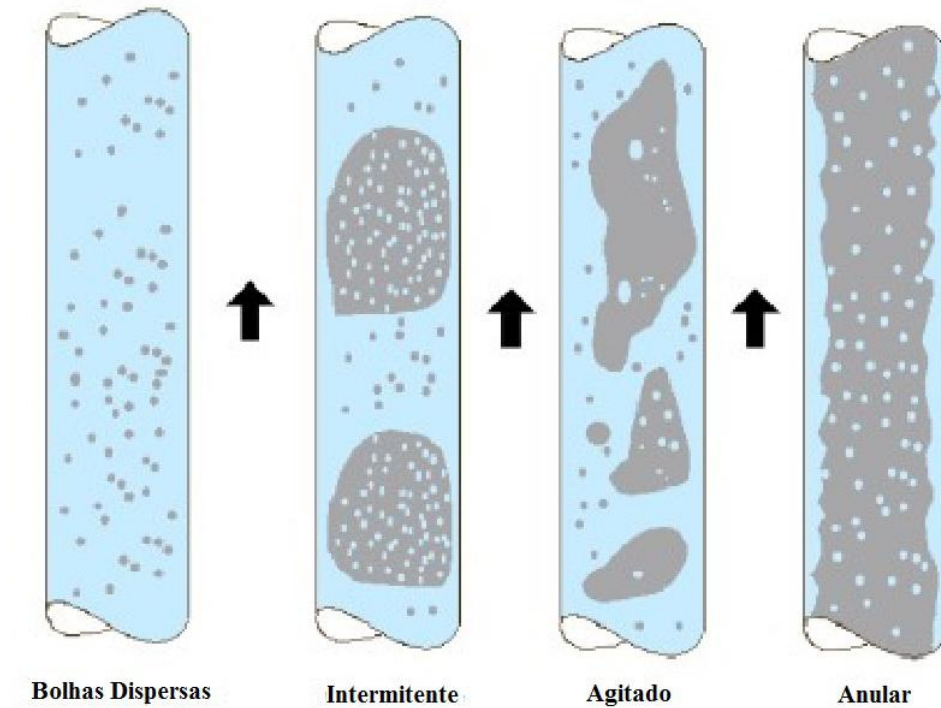


Figura 2.2: Escoamento vertical de gás e líquido ascendente, modificado WALLIS (1969).

Bolhas dispersas

Neste tipo de escoamento, a velocidade superficial do gás se mantém de baixa à média, enquanto a velocidade superficial do líquido é alta. O líquido é a fase contínua e está permanentemente em contato com a parede do duto, uma vez que o gás se encontra em pequenas bolhas dispersas, tendo muito pouca influência no gradiente de pressão do escoamento.

Intermitente ou Golfadas ou Pistonado

As características deste escoamento são semelhantes às do escoamento bolhas alongadas. Porém, no pistão de líquido, que separam as bolhas maiores existem bolhas dispersas.

Com o aumento da taxa de escoamento do gás e a queda da pressão, o número de bolhas aumenta até que estas começam a colidir. A colisão das bolhas promove

a formação de bolhas maiores. Este escoamento é conhecido como escoamento intermitente.

Sendo assim, esse escoamento é caracterizado por golfadas de líquido contendo bolhas de gás discretas, intercaladas por grandes bolhas de gás com diâmetro próximo ao do duto, separadas deste por apenas um filme de líquido.

Escoamento intermitente agitado

O escoamento intermitente agitado ou agitante ocorre quando há o aumento da vazão de gás em um escoamento pistonado. À medida que a velocidade do gás aumenta, o escoamento fica cada vez mais turbulento assim, resultando em um regime agitado.

Este padrão é caracterizado por um escoamento caótico, desordenado e por grande intermitência. As bolhas são quebradas em bolhas menores, mais estreitas e distorcidas. A continuidade do pistão de líquido é desfeita pelo gás, fazendo com que este despenque e forme uma barreira de líquido, que impulsiona o gás, o que faz com que haja um movimento oscilatório de líquido dentro do sistema vertical.

Escoamento anular

Nesse escoamento a fase líquida apresenta baixa velocidade, movendo-se próxima à parede do duto, enquanto a fase gasosa move-se em alta velocidade na região central do duto. A interface entre ambas as fases apresenta algumas ondulações e as fases contínuas de gás e líquido podem conter gotículas de líquido ou bolhas de gás, respectivamente. A vazão de gás controla o gradiente de pressão dentro da tubulação.

2.2.3 Escoamentos bifásicos inclinados

Assim como os outros escoamentos descritos acima, o escoamento inclinado tem sido estudado ao longo dos últimos anos, embora a maior parte dos trabalhos seja focada a tubulações de pequenos diâmetros.

BONNECAZE *et al.* (1971) e SINGH e GRIFFITH (1970) estudaram escoamento pistonado em tubulações inclinadas. GOULD *et al.* (1974) publicou mapas de padrão de escoamentos para escoamentos com inclinação de 45 graus e apresentou um modelo da distribuição da pressão.

Segundo o trabalho de TAITEL e DUKLER (1976), o maior efeito da inclinação é observado na transição entre os regimes estratificado e intermitente ou anular. Observou-se que o líquido se move mais rapidamente e tem um nível menor na tubulação devido às forças gravitacionais. Como resultado disso, maiores vazões de gás e líquido são requeridas para causar a transição a partir do regime estratificado e a

região estratificada aumenta consideravelmente à medida que o ângulo de inclinação aumenta.

De acordo com o que foi apresentado por WOODS *et al.* (2000), o escoamento pistonado é caracterizado pela aparência intermitente de grandes massas aeradas de líquido que preenchem toda a seção transversal do tubo e escoam aproximadamente com a velocidade do gás. Os efeitos do regime pistonado nas tubulações inclinadas dependem das vazões operacionais e das configurações da tubulação. Os modelos de escoamento pistonado foram tratados por BAGCI *et al.* (2003) podem ser divididas em três partes, os quais são: pistonado em tubos horizontais e próximos à horizontal, pistonado em tubos inclinados e desenvolvimento do padrão pistonado em tubos horizontais e inclinados. Por poder causar inúmeros problemas operacionais práticos, o padrão de escoamento pistonado deve ser estudado nos escoamentos inclinados a fim de prevenir possíveis danos ao processo.

O trabalho de VERMEULEN e RYAN (1971) mediu a velocidade do pistão, sua frequência, gradiente e flutuação na pressão em uma tubulação de diâmetro interno de 12,7 mm e inclinações de -7, 0 e 7 graus. Foi mostrado que esses ângulos não exercem influência na velocidade do pistão, diferentemente, BONNECAZE *et al.* (1971) e MUKHERJEE (1980) reconheceram que o efeito do ângulo de inclinação na fração líquida do pistão e na velocidade translacional do pistão são relevantes. Pelas divergências na literatura, é imprescindível a realização de mais estudos sobre a influência da inclinação em um escoamento.

Capítulo 3

Revisão Bibliográfica

3.1 Junção do Tipo T

REIS (2003) definiu como Junção do tipo T, ramificação “T” ou ainda tê, a região onde dois tubos se interceptam formando três ramais. Entre estes ramais o escoamento pode se combinar em uma única saída a partir de duas entradas ou se dividir entre duas saídas a partir de uma única entrada. Neste trabalho, será adotada a nomenclatura representada na Figura 3.1, onde o trecho (a) é denominado tubo ou ramal principal e o trecho (b) é denominado de tubo ou ramal lateral.

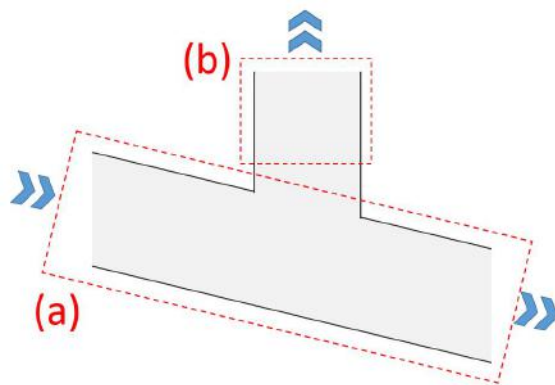


Figura 3.1: Especificação dos nomes adotados em uma junção do tipo T. As setas indicam o sentido do escoamento.

A junção do tipo T recebeu bastante atenção na literatura durante os últimos vinte anos (LAHEY, 1986). Ainda nos dias de hoje, este problema ainda não é completamente compreendido, uma vez que, praticamente, todos os parâmetros geométricos de uma junção do tipo T podem afetar a separação do escoamento. (LAHEY, 1986) e (AZZOPARDI, 1999) estabeleceram que não há nenhum modelo satisfatório existente que preveja a separação de fases em uma grande extensão de condições de escoamento e diferentes geometrias.

A descrição completa de uma junção do tipo T é feita pela especificação dos

diâmetros da tubulação de entrada, saída e ramificação, e seus ângulos associados. Os diâmetros das tubulações do ramal principal e do ramal lateral podem ser iguais ou diferentes, e são chamados de Tês regulares ou irregulares. Os três ângulos a considerar são: o ângulo do tubo principal a partir da horizontal, o ângulo da ramificação lateral a partir do tubo principal e a orientação da ramificação lateral, que pode tomar qualquer ângulo entre -90° , ramificação verticalmente para baixo, e $+90^\circ$, verticalmente para cima.

Os autores AZZOPARDI e SMITH (1992) investigaram a influência da orientação da ramificação lateral e da geometria a jusante da separação dos fluidos. Eles observaram que a quantidade de líquido separado dependia não apenas da geometria, mas também do padrão de escoamento na entrada da junção.

De acordo com BAKER (2003), as forças dominantes que influenciam na separação das fases no escoamento bifásico em uma junção do tipo T são a gravidade, inércia e pressão. A gravidade irá atuar principalmente sobre a fase líquida, empurrando o líquido para baixo e minimizando a quantidade de líquido que consegue subir na junção. Uma vez que o momentum axial do líquido é maior que o da fase gasosa, o líquido é forçado a continuar ao longo do tubo, evitando a entrada para a ramificação lateral. Quando o diâmetro da ramificação lateral é pequeno em relação a tubulação principal, este efeito torna-se mais pronunciado, uma vez que, a fase líquida terá um tempo mais reduzido para ser influenciado pela gravidade.

A típica queda de pressão na junção do tipo T é caracterizada pela própria perda de pressão entre a entrada e a ramificação lateral, e também, o aumento de pressão na tubulação principal após a junção. Este efeito é devido a uma diminuição da velocidade de mistura na tubulação principal após a ramificação, que de acordo com Bernoulli leva a um aumento da pressão. Os autores REIMANN e SEEGER (1986), PENMATCHA *et al.* (1996), MARTI e SHOHAM (1997) foram alguns que estudaram a distribuição da pressão em escoamentos bifásicos em diferentes tipos de junção do tipo T.

Outra característica dos escoamentos na junção do tipo T são seus efeitos transitórios. Como observado por BAKER *et al.* (2008), a literatura possui poucos trabalhos realizados sobre as condições de escoamento transientes. Sendo assim, uma investigação mais aprofundada é ainda mais necessária para elucidar a dinâmica desta separação e também do comportamento do escoamento bifásico antes e após a junção.

Na Tabela 3.1 é apresentado um resumo dos principais trabalhos na área que foram utilizados como referências para este estudo. A Figura ?? apresenta os referências adotados.

As siglas representadas na tabela 3.1 referente ao escoamento são definidas por: A - Escoamento Anular; BD - Escoamento Bolhas Dispersas; EO - Escoamento

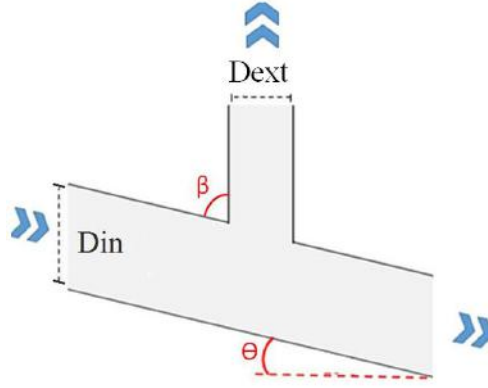


Figura 3.2: Referencial adotado na Tabela 3.1.

Autores	θ	β	D_{in} (mm)	D_{ext} (mm)	Escoamento
AZZOPARDI e WHALLEY (1982)	0 e 90	0, 21, 35, 56	32	6.35, 12.7, 19	A e IA
SEEGER <i>et al.</i> (1986)	0 e 90	-90, 0, 90	50	50	EL, S, A, BD
SHOAM <i>et al.</i> (1987)	90	0	51	51	EO e A
AZZOPARDI e SMITH (1992)	0	0 e 90	38	12.6, 25.4, 38	A, EO e EL
MUDDE <i>et al.</i> (1993)	0	90	23	10	BD
PENMATCHA <i>et al.</i> (1996)	0 / 90	-5, -10, -25, -40 e -60 / 1, 5, 10, 20 e 35	51	51	EO
MARTI e SHOHAM (1997)	0 / 90	-5, -10, -25, -40 e -60 / 1, 5, 10 e 20	51	25.5	EO

Tabela 3.1: Resumo de trabalhos sobre junção do tipo T

Estratificado com ondas; EL - Escoamento Estratificado Liso; IA - Escoamento Intermitente Agitado; S - Escoamento Pistonado. Sendo θ o ângulo de inclinação do tubo da entrada, β o ângulo de inclinação do tubo do ramal, D_{in} o diâmetro interno do tubo da entrada e D_{ext} o diâmetro interno do tubo do ramal.

3.1.1 Ensaios de Visualização

Uma maneira de avaliar os perfis de velocidade na junção é a utilização de técnicas de visualização do escoamento. Além desta análise, também pode-se caracterizar bolhas, determinando seu comprimento, velocidade, fração de vazio entre outros parâmetros. Devido à complexidade do escoamento em junções do tipo T, poucos autores exploraram esta vertente de estudo.

No estudo de HWANG *et al.* (1988), foram capturadas imagens de escoamentos em junções T de separação para geometria distintas, ramificação com angulações diferentes em relação ao ramo principal. Porém, as imagens não foram processadas pelos autores, sendo utilizadas somente para elucidar o estudo do fenômeno da separação.

O estudo de FU *et al.* (2011) avaliou a quebra de bolhas em um microcanal do tipo T de impacto, com diâmetros iguais a de $400 \mu m$ em todos os tubos e ângulo de 90° do ramo principal com as ramificações. FU *et al.* (2011) utilizaram uma câmera de alta velocidade juntamente com a técnica de micro velocimetria de partículas, permitindo assim, obter os campos de velocidade na região avaliada e o perfil de

quebra das bolhas que chegam a junção.

Para entender melhor a separação e/ou combinação de fluidos em uma junção do tipo T, faz-se um estudo monofásico. ŠTIGLER *et al.* (2012) estudaram este fenômeno experimentalmente utilizando a técnica de velocimetria por partículas, sendo a mesma de Rodâmina. Neste estudo, foi utilizado somente líquido e uma junção T de 50mm em todos os ramos, tendo a ramificação angulação de 90 graus com o trecho principal. Como resultado, foram obtidos diferentes perfis de velocidade nos diferentes ramos da junção para diferentes razões de vazões na entrada e saída.

3.1.2 Modelagem Matemática

Alguns modelos matemáticos foram desenvolvidos para elucidar o fenômeno físico presente na separação em uma junção do tipo T. Os autores BALLYK e SHOUKRI (1990), SABA e LAHEY (1983) e MA *et al.* (1990) desenvolveram estudos sobre a formulação matemática do modelo físico de separação para um escoamento anular. Esse modelo também foi estudado por AZZOPARDI e WHALLEY (1982) e HWANG *et al.* (1988). Na literatura existem outras modelagens para diferentes tipos de escoamentos com diferentes tipos de orientações da junção do tipo T, como observado por BARNEA (1987). Porém, a maioria dos modelos existentes está associada a condições muito específicas do escoamento e da geometria aplicada a estes, sendo assim, ainda mais importante o estudo de diferentes condições de entrada para a validação dos mesmos.

No estudo do escoamento bifásico em junções T, o conhecimento das variações na pressão ao longo da junção se faz de extrema importância devido à sua influência sobre o comportamento do escoamento e, como consequência, no processo de separação das fases. Assim, diversos autores estudaram a modelagem deste fenômeno, nos próximos parágrafos serão destacados alguns desses.

Os autores REIMANN e SEEGER (1986) apresentaram equações para o cálculo das diferenças de pressão entre o ramo da entrada (1) e o de saída (2), Δp_{1-2} , bem como entre o ramo da entrada e o lateral (3), Δp_{1-3} . Eles compararam estes valores com os resultados de seus experimentos de escoamento multifásico ar-água em junção T horizontal, obtendo uma boa compatibilidade. Assim como realizado por SABA e LAHEY JR (1982), CHISHOLM (1967) e BALLYK e SHOUKRI (1990), variações nas pressões foram comumente tratadas como sendo a soma do aumento reversível da pressão com a queda irreversível da mesma, ou seja:

$$\Delta p_{1-i} = (\Delta p_{1-i})_{rev} + (\Delta p_{1-i})_{irr} \quad (3.1)$$

onde

$$(\Delta p_{1-i})_{rev} = \frac{1}{2} \left(\frac{G_i^2}{\rho_i} - \frac{G_1^2}{\rho_1} \right) \quad (3.2)$$

$$(\Delta p_{1-i})_{irr} = K_{1i} \left(\frac{G_1^2}{2\rho_1} \right) \quad (3.3)$$

sendo ρ_i a densidade da mistura, G_i fluxo de massa e K_{1i} os coeficientes de perda dependentes da razão do fluxo de massa, a qual corresponde à razão das vazões volumétrica entre o ramal (3) e a entrada da junção (1), Q_3/Q_1 . Essas equações são alteradas e modeladas de maneiras diferentes dependendo do estudo sendo desenvolvido.

De acordo com BALLYK e SHOUKRI (1990), como também demonstrado nos trabalhos conduzidos por LAHEY (1986), a descrição completa do fenômeno de separação de fases em junções T pode ser realizado pelo uso de equações vindas das equações de continuidade e de equilíbrio. Nos modelos feitos por esses autores, a descrição completa do fenômeno de divisão é dada por 8 parâmetros a serem determinados: os fluxos de massa (G_1, G_2, G_3), título do escoamento (x_1, x_2, x_3) e as alterações da pressão da entrada com a ramificação (Δp_{1-3}) e entrada com saída (Δp_{1-2}). Entre esses, três devem ser independentes, as condições de contorno, e as outras cinco são dependentes, necessitando-se assim, de 5 equações para a resolução do problema. Aplicando-se as equações de continuidade do gás e da mistura, obteve-se:

$$W_1 = W_2 + W_3 \quad (3.4)$$

$$W_1 x_1 = W_2 x_2 + W_3 x_3 \quad (3.5)$$

onde W_i correspondente as vazões mássicas e x_1 o título do escoamento.

BALLYK e SHOUKRI (1990) se propuseram a formular um modelo matemático de forma a descrever o escoamento anular e a separação do mesmo em uma junção T horizontal contendo diâmetros iguais na entrada da tubulação e da ramificação. No seu estudo, a relação de variação na pressão ao longo do escoamento foi descrita a partir do equilíbrio do momento axial na junção, resultando em:

$$(\Delta p_{2-1}) = k_{(1-2)s} \left[\left(\frac{G_1^2 x_1^2}{\rho_G \alpha_1} + \frac{G_1^2 (1-x_1)^2}{\rho_L (1-\alpha_1)} \right) - \left(\frac{G_2^2 x_2^2}{\rho_G \alpha_2} + \frac{G_2^2 (1-x_2)^2}{\rho_L (1-\alpha_2)} \right) \right] \quad (3.6)$$

onde G_i é o fluxo de massa, α_i é a fração volumétrica no trecho i e $k_{(1-2)s}$ é um coeficiente adicionado para lidar com o momento axial indefinido que atravessa volume de controle pelo fluxo da ramificação. BALLYK e SHOUKRI (1990) também observou

que analisando os dados do seu experimento por meio dessa equação, o coeficiente $k_{(1-2)S}$ se distribuía entorno de um valor o qual era independente da separação do escoamento, das condições de entrada e da geometria da junção, comportando-se de maneira similar a de outro estudo feito por MADDEN e ST. PIERRE (1969).

BALLYK e SHOUKRI (1990) definiu equações para as densidades energética e homogênea, adotou formulações matemáticas diferenciais baseadas na continuidade e na conservação de momento, assumindo fluxo irrotacional para o escoamento no cálculo das velocidades do vapor e do líquido, chegando a apresentar contas para o gradiente de pressão. Entretanto, o problema foi simplificado ao considerar-se que as forças de inércia e de pressão dominavam as forças viscosas e de gravidade. Devido à essa pressuposição, o modelo só é capaz de prever o comportamento do escoamento nos intervalos de $135 \leq G_1 \leq 1325 kg.s/m^2$, $0,045 \leq x_1 \leq 0,41$ e $0,75 \leq \rho_G \leq 8,13$.

Ao invés de recorrer à análises matemáticas, SHOHAM *et al.* (1987) optou por utilizar princípios físicos na criação de um modelo empírico, capaz de prever a separação de água e ar no escoamento em uma junção T vertical composta por braços de igual diâmetro ($D_1 = D_2 = D_3 = 51mm$). Foram realizados estudos com esse modelo em 3 padrões de escoamento: estratificado liso, estratificado ondulado e anular com velocidades variantes de gás de $U_{GS} = 2,5, 6,1$ e $26 m/s$ e de água $U_{LS} = 0,0029, 0,0051, 0,0092, 0,017, 0,030$ e $0,059 m/s$. Contudo, o modelo desenvolvido quando comparado aos dados obtidos no experimento não se mostrou adequado para prever o fenômeno de separação, apesar de se conseguir algumas das características do sistema e funcionar relativamente bem em escoamento com vazões reduzidas de gás e líquido na região do desvio, tanto no para padrões de escoamento estratificado, quanto anular.

Capítulo 4

Metodologia Experimental

Neste capítulo são descritos os aparatos experimentais (seus componentes e funções), as técnicas de medição utilizadas, a relevância das incertezas de medições e o procedimento experimental aplicado.

Neste trabalho, a separação bifásica em uma junção T será analisada para uma geometria particular, onde a tubulação principal possui uma inclinação em 10 graus. A Figura 4.1 ilustra as inclinações adotadas nos ensaios e os diâmetros internos das junções do tipo T.

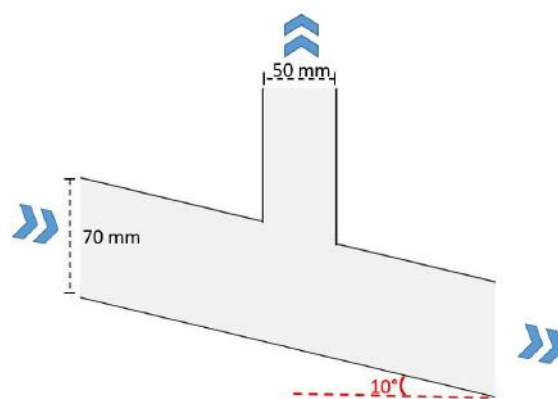


Figura 4.1: Junção do tipo T que será utilizada neste trabalho. As setas indicam o sentido do escoamento.

O aparato experimental foi montado no NIDF - Núcleo Interdisciplinar de Dinâmica dos Fluidos.

4.1 Descrição do Aparato Experimental

A seguir, serão apresentadas as características do sistema construído e o método experimental desenvolvido para a obtenção dos dados. Na Figura 4.2 é mostrado um desenho esquemático do sistema utilizado.

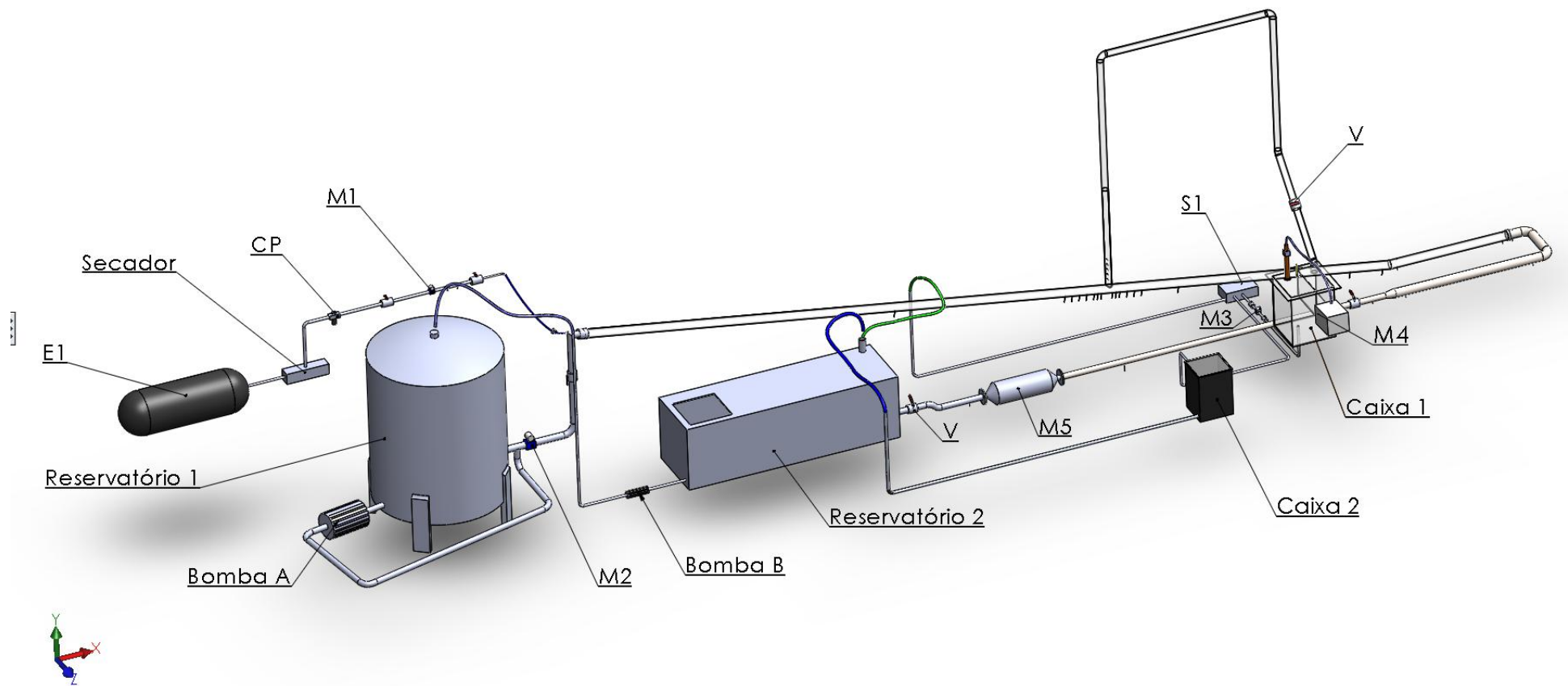


Figura 4.2: Visão geral aparato experimental utilizado neste trabalho.

Onde as siglas adotada na Figura 4.2 são descritas abaixo:

- E1 - Compressor de Ar;
- CP - Controlador/Regulador de Pressão;
- M1 - Medidor de vazão de ar comprimido (entrada);
- M2 - Medidor de vazão de líquido (entrada);
- M3 - Medidor totalizador de líquido (saída perna vertical);
- M4 - Medidor totalizador de gás (saída perna vertical);
- M5 - Medidor Coriolis (saída trecho inclinado);
- S1 - Sistema Controlador de Nível da Caixa 1;
- V - Válvulas tipo esfera Abre/Fecha.

A mistura das fases ocorre no início do trecho inclinado, em um joelho de aço inoxidável com diâmetro interno de 50 *mm*. A injeção de ar na tubulação é feita em um joelho, no início do trecho inclinado, na parte superior do tubo com mesma angulação da tubulação, 10 °. Após este curto trecho inclinado de aço inoxidável (15 *cm*) está conectado o trecho inclinado de acrílico, onde se encontra a junção do tipo T. Esta junção é composta por um tubo de entrada inclinado 10 graus para baixo, o qual está ligado a um ramal lateral orientado verticalmente para cima. O tubo inclinado possui 70 *mm* de diâmetro interno, enquanto o ramal vertical possui 50 *mm* de diâmetro interno. Tanto o escoamento do ramal vertical, quanto o escoamento do ramal inclinado à jusante, são encaminhados para separadores gravitacionais. A fase líquida retorna para o reservatório de alimentação e a fase gasosa é liberada na atmosfera.

Os tubos são feitos de acrílico transparente, a fim de permitir a utilização de técnicas de medição ópticas. No entanto, para evitar fugas e vibrações, os entroncamentos e as conexões localizadas nos cantos são feitas de aço inoxidável.

O trecho de tubulação inclinada a montante da junção T possui 4,55 *m* de comprimento, e a jusante da junção possui 2,65 *m*. Ao final do trecho inclinado, há um trecho horizontal, inicialmente, com as mesmas dimensões internas da tubulação anterior e, em seguida, há uma redução para uma tubulação de 50 *mm* de diâmetro interno. O trecho da perna vertical da junção T apresenta altura de 2,38 *m* e está conectada a uma tubulação horizontal de 1,63 *m* de comprimento que desemboca em um outra tubulação inclinada, também de 50 *mm* de diâmetro interno, conectada a uma caixa separadora (caixa 1).

4.1.1 Sistema de alimentação de ar e água

A água utilizada no experimento provém do sistema de abastecimento público e é armazenada no tanque inox com capacidade de 4000 L (reservatório 1). Neste tanque, é realizada a adição e a mistura das partículas utilizadas pela técnica de velocimetria por imagem de partículas, especificamente, partículas de rodâmina.

O sistema de alimentação de água consiste de uma tubulação de aço inoxidável AISI 316 de diâmetro interno de 50,1 mm , conectada no reservatório 1 e uma bomba volumétrica de cavidade progressiva (Bomba A), modelo NM045BY01P05V, do fabricante Netzsch. O escoamento de água é obtido através desta bomba que fornece vazão volumétrica na faixa de 0,5 a 15 m^3/h . A vazão volumétrica de água é ajustada por um inversor, modelo CFW08, do fabricante Weg, conectado à bomba.

O sistema de retorno de líquido é composto por um tanque (reservatório 2), para armazenamento temporário, dotado de uma eletrobóia instalada em seu interior; uma bomba centrífuga (Bomba B); uma tubulação de mesmo diâmetro e material da tubulação de alimentação, além de uma caixa separadora (caixa 1) de aproximadamente 90 L ligada a uma eletrobomba (componente do sistema S1) com conexões destinadas ao reservatório 2, como pode-se observar na Figura 4.2.

O sistema de ar comprimido é composto por um compressor rotativo SCHULZ (modelo SRP3015 Compact, de 15 Hp de Potência e 200 litros de capacidade), um secador SCHULZ SRS60 (ar com umidade relativa inferior a 1%) e um separador de condensado. Este sistema gera vazões da ordem de 1400 L/min de ar comprimido com pressão de trabalho de 8 bar . A tubulação de ar comprimido é de aço inoxidável AISI 316 de diâmetro externo de 25,5 mm e de interno de 21,5 mm .

Antes de ser injetado no misturador do aparato, o ar passa pelo sistema de secagem e por válvulas reguladoras de pressão, a fim de minimizar erros na medição de vazão. A vazão volumétrica de ar é ajustada e medida por medidores tipo vórtex que serão descritos na próxima seção.

4.1.2 Sistema de medição de dados

Medições de Balanço Mássico e Pressão

Para melhor descrever o sistema, a junção do tipo T foi caracterizada: o trecho à montante da junção foi denominado de trecho 1, o trecho à jusante da junção foi denominado de trecho 2 e o ramal vertical foi denominado de trecho 3 (Figura 4.3).

O sistema de medição de dados no trecho 1 é composto por três medidores de vazão, um para a fase líquida e dois para a fase gasosa. O medidor de entrada da fase líquida é do tipo volumétrico ultrassônico *KROHNE* UFM3030 com intervalo de medição de 4 a 15 m^3/h . Para a medição da fase gasosa na entrada do sistema

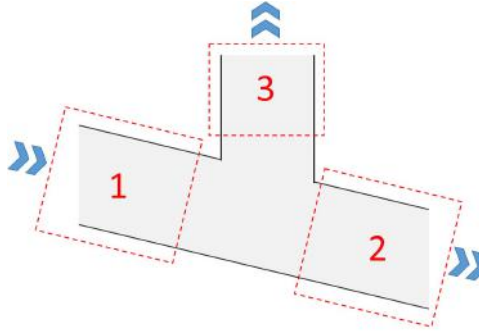


Figura 4.3: Trechos da junção do tipo T. As setas indicam o sentido do escoamento.

utilizou-se um rotâmetro *DWYER* (ensaios de *Shadow Sizing* e *PIV*) de intervalo de medição de 0 a 5 L/min e um medidor do tipo vórtex *OVAL Japan* modelo FLP08-G2NA (ensaios de pressão e mássicos), com faixa de operação de 18 a 90 L/min .

O sistema de medição de dados no trecho 2 é constituído de um único medidor de vazão, o Coriolis KROHNE Optimass 1300C. A mistura que flui ao longo do tubo inclinado no trecho 2 passa através do Coriolis equipado com um densímetro, desse modo, ambas as fases gasosa e líquida podem ser quantificadas.

Como já mencionado, no final do trecho 3 foi instalada uma caixa separadora, para que haja a separação gravitacional das fases gasosa e líquida. Nesta caixa, foram instalados medidores de vazão de ambas as fases. No topo da caixa, foi instalado uma entrada para a alocação de um medidor do tipo vórtex *OVAL Japan*, dependendo da vazão de operação, pode-se usar o modelo FLP08-G2NA de 18 a 90 L/min ou o modelo FLP15-G2NA de 50 a 250 L/min . Para garantir mais ainda a determinação da vazão de gás no trecho 2, foi acoplado na saída do medidor tipo vórtex um medidor padrão totalizador de volume de gás tipo diafragma marca ITRÓN ACD-G16 de faixa de vazão de 0,16 a 25 m^3/h .

No fundo da caixa separadora do trecho 3 foi instalado um trecho de tubulação em acrílico conectado a um hidrômetro ITRÓN modelo UnijatoCyble de faixa de medição de 50 L/min a 5000 L/min que mede o volume totalizado.

Nos trechos foram monitoradas as temperaturas através da leitura em termopares tipo K da *Impac Comercial* com indicador Picolog da *Picolog Technology* instalados junto a tubulação de aço inox isolados termicamente do ambiente. Também foram feitas medições de temperatura ambiente com auxílio de um termohigrômetro, marca Siberius, modelo HTC-2.

Foram realizadas medições de pressão e temperatura das fases gasosas isoladamente, para correção das vazões. Nos trechos 1 e 3, utilizou-se manômetros digitais NAKA de faixa de 0 a 10 bar e -1 a 2 bar , respectivamente, que não apresentam erro sistemáticos quando comparados a um medidor padrão. Também foi realizada a conferência da pressão atmosférica pelo site do CPTEC.

A medição de pressão da mistura ao longo do aparato foi realizada por mais três medidores, um absoluto *Endress Hauser* (0 a 6 *bar*) e dois diferenciais *Endress Hauser Deltabar* (0 a 100 *mbar* e 0 a 500 *mbar*), viabilizando um estudo sobre a perda de carga no escoamento.

Há ainda válvulas de controle localizadas antes da caixa separadora no trecho 3 e no final do trecho 2, que podem ser utilizadas para ajustar a queda de pressão na derivação vertical. Para este trabalho as válvulas sempre se mantiveram totalmente abertas.

Medições nos Ensaios de Visualização

Para a captação das imagens usadas nos ensaios de visualização, na região em torno da junção T, foi utilizado uma câmera de alta velocidade, modelo Speed Sense M310, código 9084C2211, número de série 112, do fabricante *Dantec Dynamics*, que apresenta resolução máxima de 1280x800 pixels, em conjunto com uma lente modelo AF D Micro-Nikkor 50mm f/2.3D, do fabricante Nikon. O plano focal da câmera coincide com o plano laser do experimento.

Utiliza-se, ao redor da junção T, uma caixa de acrílico preenchida com água destilada, medindo 310 *mm* de altura, 200 *mm* de largura e 800 *mm* de comprimento, cuja função é reduzir distorções nas imagens captadas, causadas pela diferença entre os índices de refração dos ambientes interno e externo à junção, além do perfil cilíndrico dos dutos.

As Figuras 4.4 e 4.5 ilustram o aparato montado para a execução dos ensaios de visualização e captação de imagens.



Figura 4.4: Montagem realizada para os ensaios de *Shadow Sizing*.

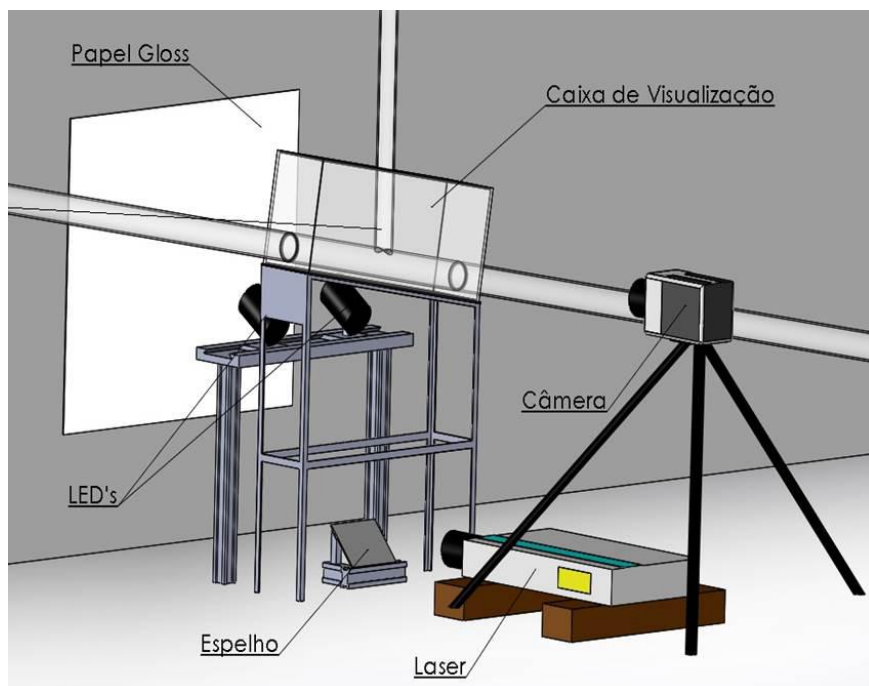


Figura 4.5: Montagem realizada para os ensaios de *Shadow Sizing* mais PIV.

Devido à impossibilidade espacial para alocação do laser, foi instalado a frente do feixe emitido um espelho de dimensões $20 \times 15 \text{ cm}$, responsável por refletir o plano do laser para que o mesmo passe pelo eixo vertical do trecho inclinado da junção T. Este plano é gerado pelo laser modelo NANOL 135-15, número de série LM0870, do fabricante *Dantec Dynamics*, emite luz no comprimento de onda 532 nm e é controlado pela unidade de potência laser (UPL), modelo LPU-550, número de série 70034/0239, do fabricante *Dantec Dynamics*.

Tomando como referência o plano laser, responsável por iluminar as partículas presentes na fase líquida, de um lado está a câmera e, do outro, um conjunto de LEDs, modelo *Constellation 120 5600K*, do fabricante *Veritas*, que emitem luz com comprimento de onda superior a 550 nm , e possuem a função de gerar uma iluminação de fundo na imagem captada pela câmera, revelando as bolhas que atravessem seu campo visual através de sua sombra. Este conjunto é composto por dois LEDs voltados para um papel tipo *Gloss* branco, a iluminação é refletida pelo mesmo, resultando em uma iluminação uniforme na grande região de interesse.

Entre a iluminação do conjunto de LEDs e a caixa de acrílico foi posicionado um papel difusor ótico que permite distribuir a luz proveniente dos LEDs de maneira mais uniforme, evitando regiões com luminosidade concentrada, que podem dificultar a identificação das partículas iluminadas pelo laser, além de saturar os sensores da câmera.

As partículas de rodâmina presentes na fase líquida possuem diâmetro médio na faixa de $5 \mu\text{m}$ a $20 \mu\text{m}$ e foram adicionadas à esta fase de forma a garantir a

presença de 10 a 20 partículas por área de investigação (ADRIAN, 1991), sendo a menor área de investigação utilizada neste trabalho correspondente a 8x8 pixels. As partículas refletem luz no comprimento de onda da luz incidente (532 nm) quando iluminadas pelo plano laser, bem como emitem luz em um segundo comprimento de onda, na faixa entre 550 a 670 nm (DYNAMICS, 2002), com pico de intensidade entre 570-575 nm (DUVENECK *et al.*, 2003). Também é utilizado um filtro ótico junto à lente da câmera, que permite a passagem de luz com comprimento de onda superior a 570 nm, a fim de somente captar a luz emitida pelas partículas e pela iluminação de fundo gerada pelos LEDs, eliminando os efeitos indesejados do reflexo do laser na parede da tubulação.

A câmera, o laser e os LEDs estão conectados a um sincronizador, modelo 9080N0772, número de série 702, do fabricante *Dantec Dynamics*, responsável pela sincronização do acionamento destes três equipamentos. Para que os parâmetros do Laser, assim como os dos LEDs, sejam ajustados e acionem em sincronia (garantindo a iluminação regular de fundo em todas as imagens captadas), estes foram controlados através do dispositivo chamado *Pulse Receiver* do programa utilizado.

Todo o sistema de aquisição de imagens mencionado acima, câmera e sincronizador, é conectado a um computador que possui 8 Gb de memória RAM, processador Intel(R) Core(TM) i3-4160 e sistema operacional Windows 7 Professional 64 bits, onde o software *Dynamic Studio 2015a*, versão 4.15.115, atua como interface entre o usuário e os equipamentos de visualização e captação de imagens, permitindo, via sincronizador, o controle destes dispositivos, bem como a visualização e o armazenamento das imagens diretamente enviadas pela câmera. Este software apresenta parâmetros para configuração dos dispositivos a ele conectados que, por consequência, ajustam a forma na qual as imagens são captadas, possibilitando o tratamento e o processamento das mesmas. Para este estudo, a frequência de captação das imagens foi igual a 15 Hz e o tempo de captação em duplo quadro (*double frame*) foi de 500 a 800 μs , totalizando em cada aquisição no máximo de 2010 imagens.

4.1.3 Sistema de aquisição de dados

A instrumentação utilizada no sistema de aquisição de dados, basicamente, consiste em circuitos de interfaceamento entre os sinais dos medidores e o tipo de sinal de entrada da placa de aquisição de dados utilizada (Placa de aquisição da marca ÔMEGA, 12 bits de resolução e modelo OM1008). Para os medidores de pressão, cuja saída de sinal segue o protocolo HART (saída em corrente de 4 a 20 mA), foi aplicado um circuito para conversão corrente/tensão, filtragem e eliminação de ruído de modo comum através do uso de um amplificador de instrumentação.

Uma vez que o circuito descrito acima e a relação corrente por pressão do medidor

são lineares, é possível obter uma relação da tensão pela pressão do medidor também linear. Desta forma, é necessário fazer uma calibração dos medidores de pressão a fim de se obter os coeficientes angular e linear desta reta. Essa calibração foi realizada variando-se uma pressão estável na entrada do medidor (coluna estática de água ou pressão de gás após um regulador de pressão), efetuando a leitura do seu indicador e obtendo sua correspondente correlação em Volts, através do software de aquisição de dados.

Para os medidores de vazão, cuja saída é em pulsos de 24 V por volume totalizado foi utilizado um circuito simples, resistivo, e de alta impedância de entrada para adequação da amplitude do sinal do medidor aos limites da placa de aquisição de dados (10 V). Neste tipo de sinal, cada pulso enviado representa uma quantidade de volume totalizado pelo medidor, este número é denominado de fator k . Cada medidor de vazão possui um fator k que lhe é característico. Desta forma, pode-se obter informações do volume totalizado ao longo do experimento e da vazão, que é proporcional à frequência de emissão destes pulsos.

O hidrômetro utilizado na saída da caixa separadora para medição da vazão e totalização de volume do trecho 3, por não possuir um modo de saída de sinal, teve que ser adaptado a fim de que se pudesse fazer aquisição de suas medições. Para tanto, foi utilizado um par de laser e fotodiodo: o feixe de laser incidindo em uma hélice, que gira proporcionalmente a vazão, e a reflexão do fundo branco, a interferência de cada pá da hélice permite obter um sinal em frequência proporcional a vazão do instrumento. Para isso, foi projetado um circuito amplificador de transimpedância para conversão da corrente/tensão do fotodiodo, amplificação e filtragem. Para o laser foi utilizado um circuito de fonte de corrente constante baseado no componente LM350.

Para calibração da frequência do sinal gerado pelo circuito de instrumentação do hidrômetro, foram realizados sucessivos testes em que se mediu o balanço de volume totalizado e o tempo, a fim de se ter o volume total e a vazão, e comparou-se com os dados obtidos no programa de aquisição (frequência do sinal gerado e o número de pulsos totalizados obtidos a partir da binarização do sinal analógico). Através deste procedimento, foi obtido o fator de correlação entre pulsos e volume totalizado.

Para alimentação de todos os circuitos, medidores de pressão e um dos indicadores de vazão de gás utilizou-se um banco de baterias 12V, 7Ah. Para os demais medidores de vazão de gás a alimentação elétrica se deu pela rede 220 V (AC).

Para registro dos dados, utilizou-se uma placa de aquisição da Ômega (modelo OM1008) no modo “single ended” com os sinais compartilhando o mesmo terra. A placa possui resolução de 12 bits e utilizou-se uma taxa de amostragem de 5 kHz .

Na Figura 4.6 pode-se observar o primeiro programa de aquisição de dados (relacionado aos medidores de vazão de gás, medidores de pressão absoluta e o hidrô-

metro) feito em programa *Labview*.

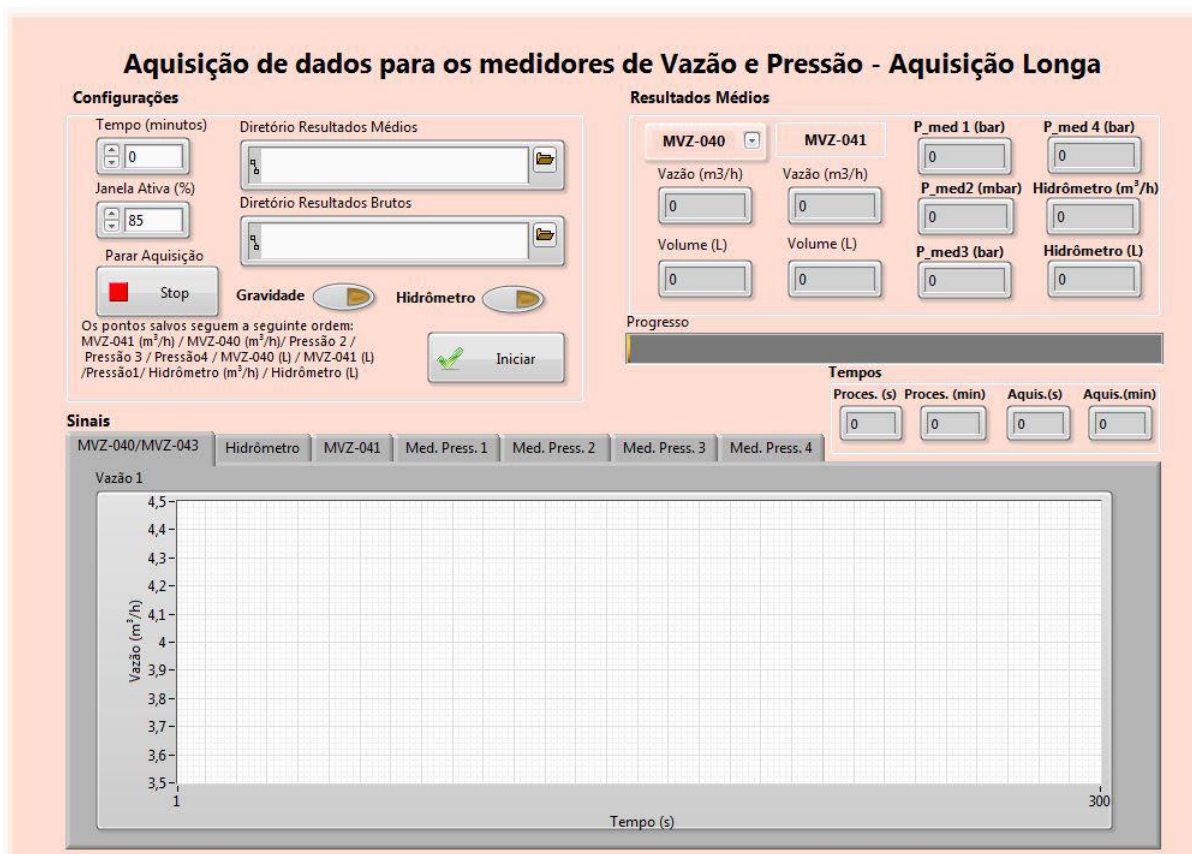


Figura 4.6: Programa para aquisição de dados

Na aba de configurações deste programa, existem os diretórios de resultados médios e brutos, onde são salvos os arquivos contendo os resultados ao longo do tempo de aquisição e os resultados médios de cada medidor, respectivamente. O usuário deve inserir ainda um intervalo de tempo de aquisição de dados em minutos. No campo “Janela Ativa”, o usuário insere um valor percentual que representa o quanto de cada unidade de segundo o programa estará aquisitando dados, o percentual complementar indica o percentual de tempo de cada segundo gasto com limpeza de *buffer* da placa e gravação dos dados na memória do computador: as informações não obtidas no curto intervalo de tempo complementar são reconstruídas por interpolação.

O botão chamado “Hidrômetro” ativa o pós-processamento do sinal deste instrumento, o botão “Gravidade” otimiza o filtro digital projetado, para trabalhar com frequências mais baixas, além dos botões de “iniciar” e “stop”, que dão início e interrompem a aquisição, respectivamente. Nas abas de “resultados médios” são indicadas as médias da medição de cada instrumento e em “Sinais” são indicados os sinais pós-processados de cada medidor ao longo do tempo de aquisição.

Na Figura 4.7 pode-se observar o segundo programa de aquisição de dados, relacionado ao medidor de pressão diferencial, feito também em *Labview*.

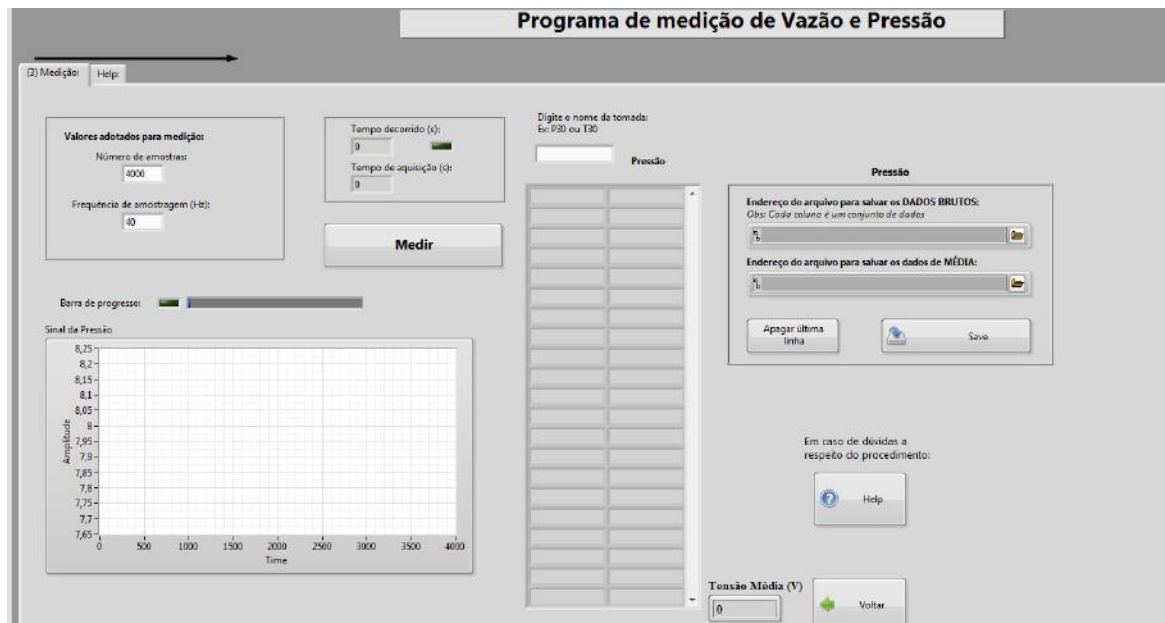


Figura 4.7: Programa para aquisição de dados de pressão diferencial

No programa cuja interface está indicada na Figura 4.7, pode-se inserir a frequência de amostragem da placa de aquisição de dados e o número de amostras que deverão ser obtidas. Este programa é utilizado para organizar as pressões diferenciais em uma tabela com cada linha contendo o nome da tomada de pressão (dado pelo usuário no campo específico) e a respectiva pressão média. É possível ainda apagar uma tomada de dados mal sucedida em “Apagar última linha” e salvar o sinal bruto e a tabela com os valores médios.

Sistema Caixa Separadora

Na caixa separadora do trecho 3 foi instalado um sistema de controle visando manter constante a pressão no sistema, para que assim, não houvesse interferência da mesma na taxa de separação da junção T. O projeto do sistema da caixa separadora, caixa 1, consiste em um controlador de nível constante, baseado em sensores eletroresistivos, bombas e válvulas solenoide, além de uma segunda caixa separadora - caixa 2, conforme ilustrado na Figura 4.8.

Descrição da Figura 4.8:

- Caixa 1: caixa separadora principal, de acrílico, transparente na qual está posicionado o sensor 1;
- Caixa 2: caixa acumuladora, de acrílico, preta, na qual está posicionado o sensor 2. Esta caixa é utilizada quando o sistema opera no modo “gravidade”, e serve para acumular a fase líquida, em baixa vazão, proveniente da caixa 1;

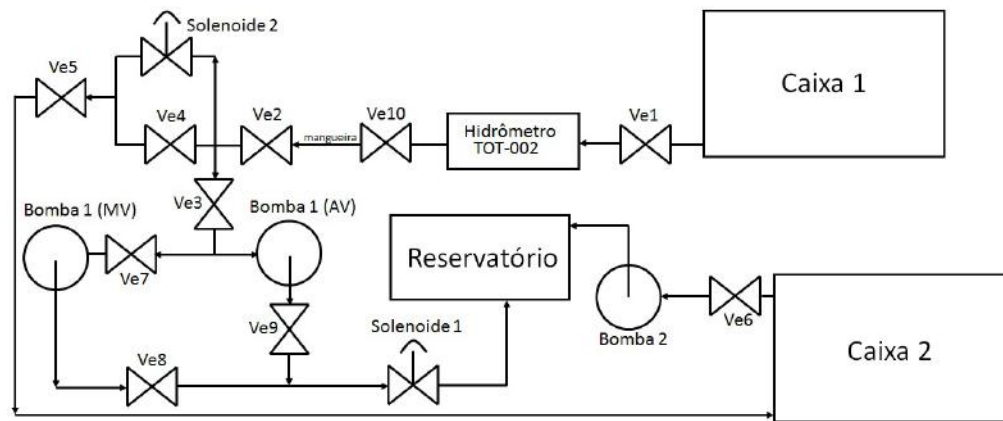


Figura 4.8: Componentes de medição de dados no Trecho 3.

- Válvula Solenóide 1: normalmente fechada, de 127Vac, 3/4" e com 20 mm de orifício, para controle do nível da caixa 1. Atua juntamente as bombas 1 (AV e MV), estando após estas no circuito hidráulico. A válvula solenóide 1 é utilizada quando o sistema está no modo “bomba” e abre sempre 40 ms antes de se ligar a bomba 1 e fecha 40 ms depois de se desligar a mesma;
- Válvula Solenóide 2: normalmente fechada, de 127Vac, 3/4" e com 20 mm de orifício, para também controlar o nível da caixa 1. A válvula solenóide 2 é utilizada quando o sistema está operando no modo “gravidade”;
- Bomba 1 (MV): bomba de média vazão, utilizada comumente em máquina de lavar roupas, controla o nível de líquido da caixa 1. Esta bomba atua se a caixa controladora estiver operando no modo “bomba”;
- Bomba 1 (AV): bomba centrífuga com motor monofásico de 127V (AC) e com potência de 1/2" CV, utilizada para controle de nível da caixa 1. Esta bomba atua se a caixa controladora estiver operando no modo “bomba”;
- Bomba 2: bomba de média vazão que é utilizada para o esvaziamento da caixa 2;
- Ve1, Ve2, Ve3, Ve4, Ve5, Ve6, Ve7, Ve8, Ve9 e Ve10: Válvulas esfera de PVC, de controle manual.

O primeiro elemento deste sistema é a caixa controladora de nível, a Figura 4.9 representa a parte frontal da mesma.

Na parte frontal desta primeira caixa encontra-se uma chave de liga/desliga com led vermelho indicador, conectores do tipo mike de três pinos para se conectar o cabo do sensor 1 e o cabo do sensor 2. Tem-se ainda uma chave seletora que atua no sistema do sensor 1: se a chave seletora estiver no modo “bomba”, o led verde

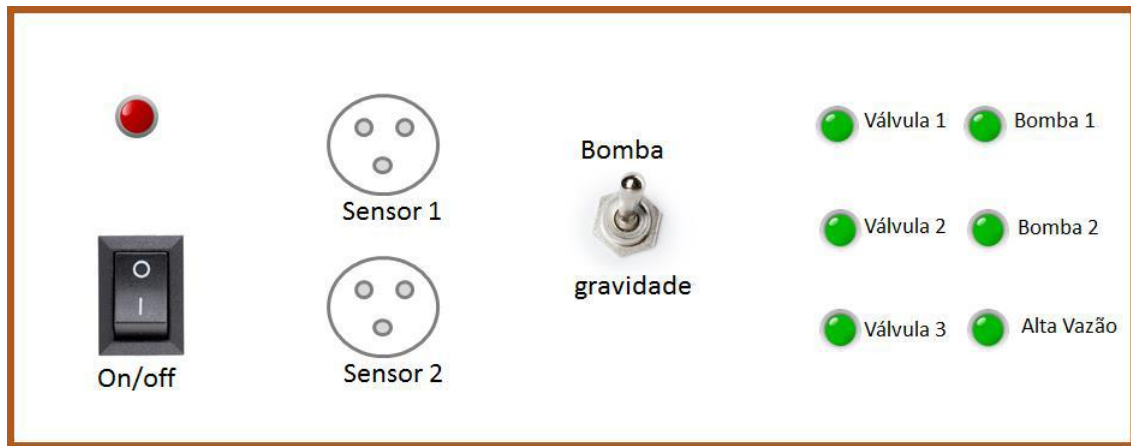


Figura 4.9: Painel Frontal da caixa controladora.

no painel à direita com nome “alta vazão” se acende e as bombas 1 (duas bombas serão utilizadas, uma de média e outra de alta vazão) serão utilizadas neste sistema juntamente com a válvula 1; se a chave estiver no modo “gravidade” o led se apaga e o controle do nível no sistema, onde está alocado o sensor 1, se dá através da válvula 2 (exclusivamente). Na parte frontal, destaca-se ainda o painel de leds verdes, que sinalizam quando a carga indicada está ligada. O uso da válvula 3 é opcional e decidiu-se por não utilizá-la no arranjo experimental.

Conectada a caixa controladora de nível está a caixa de sensor, esta caixa integra o sistema da caixa 1/sensor 1. Ela foi criada a fim de que se possa utilizar sensores distanciados em 3 *cm* ou 5 *cm*, dependendo do grau de oscilação da lâmina d’água no interior da caixa separadora. Na Figura 4.10 pode-se observar a sua representação.



Figura 4.10: Painel frontal da caixa de sensor.

No plugue identificado como “entrada”, deve-se conectar o cabo que o ligue ao plugue de nome “sensor 1”, localizado na caixa controladora. O plugue identificado como “sensor” deve ser ligado ao sensor localizado no interior da caixa 1 (caixa separadora). A chave seletora define a utilização de sensores espaçados em 3 *cm* ou 5 *cm*.

Os sensores de níveis 1 e 2 estão localizados na caixa 1 e na caixa 2, respectivamente. O sensor 1 é constituído por duas faixas de variação máxima da lâmina

d'água: 3 *cm*, quando a caixa de sensores é ajustada para “baixa vazão”, ou 5 *cm*, quando a caixa de sensores é ajustada para o modo “alta vazão”.

Neste sensor tem-se um emissor em 5v e três receptores (s_1 , s_2 e s_3), onde dois (s_2 e s_3) são comutados de acordo com a posição da chave da caixa de sensores (Figura 4.11). O princípio de funcionamento é resistivo. O sensor de nomes “ s_2 ” e “ s_3 ” demarcam o nível máximo: quando a lâmina d'água toca um destes sensores (dependendo de qual foi selecionado na caixa de sensor), o sistema de controle de nível atua e deixa de atuar apenas quando a lâmina d'água fica abaixo do nível do sensor “ s_1 ”.

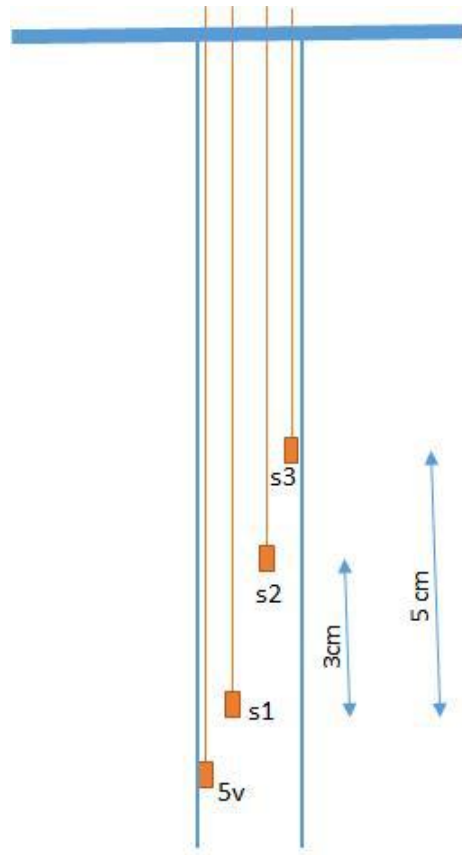


Figura 4.11: Geometria do Sensor 1.

O sensor 2 é constituído por um emissor em 5v e dois receptores distanciados de 5 *cm* (um de nível mínimo e outro de nível máximo).

Os sensores foram inseridos em uma tubulação de acrílico furada de 1 polegada acoplada na tampa das caixas 1 e 2, a fim de amortecer as oscilações do nível de água.

No circuito do sistema de controle de nível foram utilizados dois microcontroladores: Atmega328p e PIC12f675. A conversão resistência-tensão dos sensores se dá em um circuito divisor de tensão com resistores de 150k. O Atmega328p monitora os níveis de tensão a fim de perceber o momento em que a lâmina d'água toca

um dos sensores, mudando bruscamente a resistência e a tensão correspondente. Utilizaram-se também transistores para acionamento da bobina do relé. O papel do microcontrolador PIC é monitorar o microcontrolador Atmega328p. A cada 30s o PIC dá um reset no Atmega328p. A cada nova amostragem o Atmega envia um sinal ao PIC, para indicar que está operando corretamente. Se o envio deste sinal demorar mais do que 2 segundos, o PIC imediatamente reseta o Atmega. E se, ainda assim este último não responder com o envio do sinal, o PIC desliga todas as cargas e aciona um alarme indicando que o sistema está em falha.

4.2 Técnicas para o Balanço de Massa

Um balanço de massa ou balanço material é uma aplicação do princípio da conservação de massa para a análise de sistemas físicos, consiste em uma descrição dos fluxos de massa para dentro e fora do sistema, descrevendo as vazões e concentrações de cada corrente.

Para avaliar a eficiência da separação gás-líquido na junção do tipo T foram realizadas análises de balanço mássico do sistema através da medição das vazões de líquido e gás de entrada e em ambas as saídas da junção. Para a fase gasosa foram realizadas as correções de pressão e temperatura. Também foram aplicados fatores de correção das medidas indicadas nos medidores, de acordo com as calibrações realizadas previamente aos ensaios.

Antes do início dos ensaios, a estanqueidade do sistema foi testada através da avaliação de uma pressão aplicada com fase gasosa no sistema, onde a mesma permaneceu constante durante certo intervalo de tempo quando o sistema foi fechado por completo (válvulas na entrada e saídas).

Uma vez que há injeção de ar comprimido na tubulação, ponto de mistura das fases, faz-se necessário a correção destas vazões para as condições da tubulação, utilizando as respectivas pressões e temperaturas.

4.2.1 Correção da Vazão de Ar Comprimido

As condições de pressão e temperatura no ponto de injeção de ar comprimido na tubulação, P_{tub} e T_{tub} , são diferentes das condições no local de instalação do medidor de gás (rotâmetro e vórtex), P_{ar} e T_{ar} , que fornece o valor instantâneo da vazão volumétrica de gás injetado, Q_{Gmed} . Levando em consideração que a vazão volumétrica deve ser corrigida da condição medida para a condição do ponto de injeção, Q_G , deve-se obter os seguintes dados:

- pressão no medidor de gás, calculando média dos registros (P_{ar}).

- pressão na tubulação (P01), calculando média dos registros (P_{tub}).
- temperatura do ar injetado, calculando média dos registros em Kelvin (T_{ar}).
- temperatura da água, calculando média dos registros em Kelvin(T_{tub}).
- pressão atmosférica (P_{atm}).

De posse desses dados, é possível realizar a correção da vazão de gás injetado através da seguinte equação:

$$Q_G = \frac{Q_{Gmed} \times P_{ar} \times T_{tub} \times f_{Q_G}}{P_{tub} \times T_{ar}} \quad (4.1)$$

onde f_{Q_G} é o fator de correção da vazão volumétrica de ar medida devido à calibração do instrumento de medição e a P_{atm} é somada as pressões dos medidores.

4.3 Medição de Pressão

Para avaliar a queda de pressão ao longo do sistema foram instaladas 34 tomadas de pressão, sendo 9 tomadas antes da junção (trecho 1), 19 tomadas após a junção (trecho 2) e 6 tomadas no ramificação vertical (trecho 3), sendo utilizados medidores de pressão já especificados na seção 4.1. As tomadas de pressão do sistema são representadas com suas respectivas distâncias no sistema nas Figuras 4.12 e 4.13.

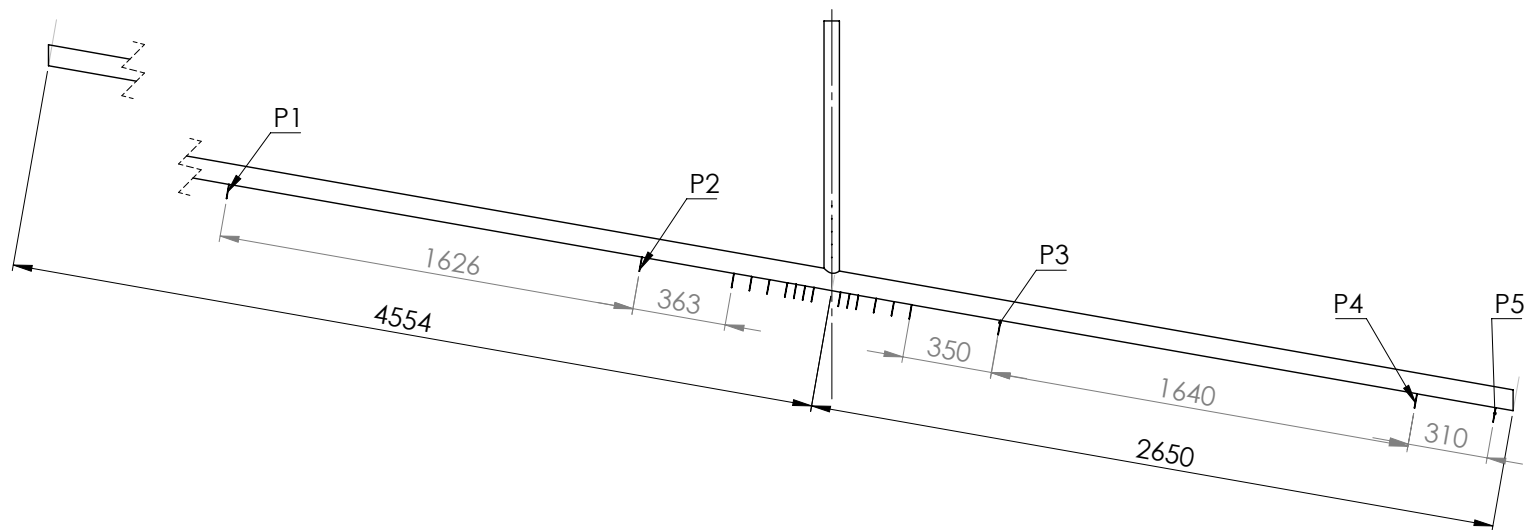


Figura 4.12: Tomadas de pressão no trecho inclinado.

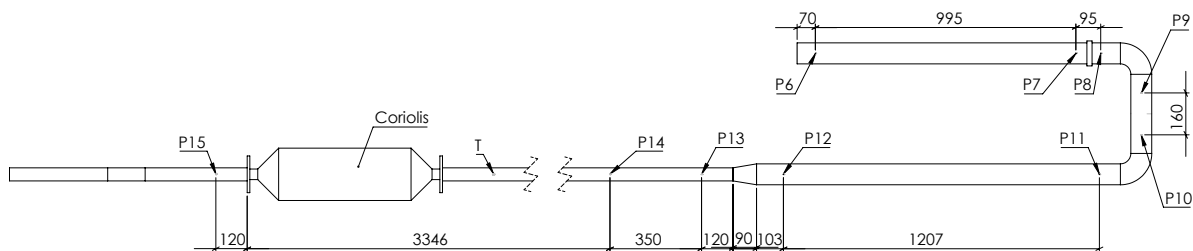


Figura 4.13: Tomadas de pressão no trecho horizontal.

As mangueiras que conectam a tomada de pressão com os medidores são preenchidas com a fase líquida. As tomadas foram instaladas na parte inferior da tubulação para prevenir a entrada da fase gasosa. Nas proximidades da junção T, as tomadas de pressão no ramo vertical da junção tem espaçamento de 5 cm, as tomadas de pressão do trecho inclinado se distanciam com espaçamentos de 7 cm, com exceção das tomadas muito próximas a junção (3,5 cm), conforme ilustrado no Figura 4.13.

As outras tomadas de pressão espalhadas pelo aparato experimental possuem a função de avaliar a perda de carga pelos acidentes, sendo assim, a cada pequeno acidente foi alocado um ponto de pressão imediatamente antes e outro imediatamente depois.

Foram realizadas três campanhas de medições de pressão para o estudo monofásico e bifásico, onde a primeira avaliou a perda de carga próxima a junção T, outra avaliou a perda de carga no aparato, principalmente, dos acidentes após a junção, e por último a pressão manométrica nos pontos de referência.

O teste de avaliação de queda de pressão consiste em medir a pressão diferencial entre as tomadas de pressão iniciais e finais do aparato, considerando uma das tomadas a tomada de alta pressão e as outras consideradas de baixa pressão. As tomadas de baixa pressão ficam conectadas entre si, formando uma árvore de pressão (Figura 4.15), onde após a medição de cada tomada, a válvula que direciona o escoamento ao transdutor de pressão é fechada e, em seguida é aberta a válvula da

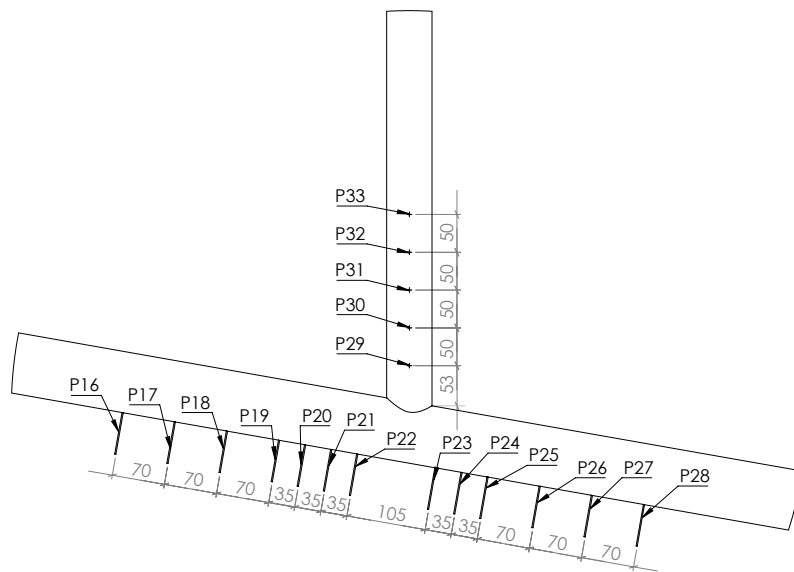


Figura 4.14: Tomadas de pressão na junção T.



Figura 4.15: Tomadas de pressão do aparato experimental.

tomada seguinte. Após 1 minuto de estabilização inicia-se uma nova medição.

Também foi medida a pressão absoluta em alguns pontos de pressão da tubulação, P01, P02, P16 e P29. Com a combinação dos dados de pressão diferencial e a pressão manométrica nestas tomadas é possível determinar a pressão local para qualquer tomada do aparato experimental a partir do delta de pressão. Para o cálculo da pressão absoluta nos pontos de pressão do trecho inclinado, deve-se considerar um termo adicional no cálculo conforme Equação 4.2.

$$P_i = P_{i-1} - (P_{i-1} - P_i) + \rho g \Delta L \sin(\theta) \quad (4.2)$$

sendo θ o ângulo de inclinação da tubulação, neste caso, 10° , ΔL a distância entre um ponto de pressão P_i e outro P_{i-1} e g a gravidade.

4.4 Técnicas de Medição para Visualização de Escoamentos

A visualização quantitativa e qualitativa de um escoamento evoluiu consideravelmente nas últimas décadas. Esta visualização permite inferir informações sobre o campo de velocidades do escoamento e a distribuição de fases. O presente estudo utilizará duas técnicas bastante difundidas para a visualização de escoamentos bifásicos líquido-gás: *Shadow Sizing*, que permite estimar o tamanho, a distribuição e a velocidade de bolhas de gás do escoamento através da sombra por elas gerada. *Particle Image Velocimetry* (PIV), onde a determinação de campo de velocidades do escoamento é realizada pela estimativa do deslocamento, no tempo, de partículas presentes no escoamento. Os dois próximos tópicos descrevem, sucintamente, cada uma destas técnicas.

4.4.1 Detecção de contorno por sombras (Shadow Sizing)

O sistema de detecção de contorno por sombras (*Shadow Sizing*) é uma técnica de medição ótica que utiliza a sombra gerada por um objeto para determinar o tamanho, forma, distribuição e velocidade do mesmo, é muito utilizada para o estudo de escoamentos bifásicos, onde pode-se determinar os parâmetros de partículas, gotas ou bolhas nos escoamentos.

Nesta técnica, as sombras são captadas por uma câmera quando o objeto passa entre a fonte de luz difusa e a câmera, estes equipamentos estão dispostos frontalmente, sendo a fonte luminosa posicionada na parte traseira do escoamento. As imagens obtidas são processadas para a identificação tanto do contorno dos objetos, quanto do seu deslocamento entre imagens consecutivas.

A Figura 4.16 apresenta um esquema do princípio de funcionamento da técnica de detecção de contorno por sombras. A sombra de um objeto de interesse é captada por uma câmera quando este entra em seu campo visual (objeto iluminado por LEDs - fonte de iluminação traseira). Antes de atingir o escoamento, a luz emitida pelos LEDs passa por um anteparo opaco a fim de distribuí-la uniformemente, evitando regiões onde haja luminosidade concentrada.

A identificação dos objetos de interesse é realizada na etapa de pós-

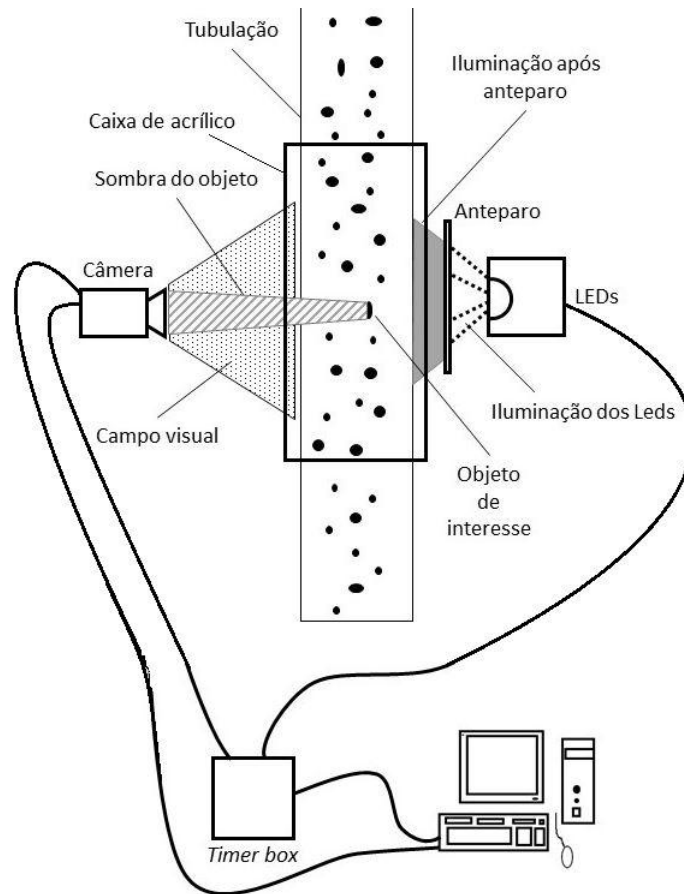


Figura 4.16: Esquema do princípio de funcionamento da técnica *Shadow Sizing*.

processamento das imagens captadas, com a ajuda de um algoritmo ou software especializado (*Dynamic Studio Shadow Sizer* – desenvolvido pela *Dantec Dynamics*). Após isto, parâmetros como diâmetro equivalente, orientação, excentricidade, fator de forma, perímetro, posição, velocidade e momentos de inércia podem ser obtidos (DE OLIVEIRA, 2009).

4.4.2 Velocimetria por Imagem de Partículas

Um dos métodos mais aplicados na determinação do campo de velocidades de um escoamento é a técnica de Velocimetria por Imagem de Partículas (*Particle Image Velocimetry* - PIV), onde a velocidade de partículas no escoamento é determinada pelo acompanhamento do deslocamento destas partículas, no tempo, com o auxílio de ferramentas estatísticas. As partículas, que podem pertencer ao próprio escoamento (bolhas de gás ou sólidos) ou que tenham sido propositalmente adicionadas ao sistema, são iluminadas, em um plano do escoamento, ao menos por duas vezes em um curto intervalo de tempo. A luz dispersa pelas partículas é registrada em fotografias consecutivas, que são avaliadas em pós-processamento para determinação do deslocamento e consequentemente a determinação da velocidade das partículas.

A Figura 4.17 ilustra o princípio de funcionamento desta técnica.

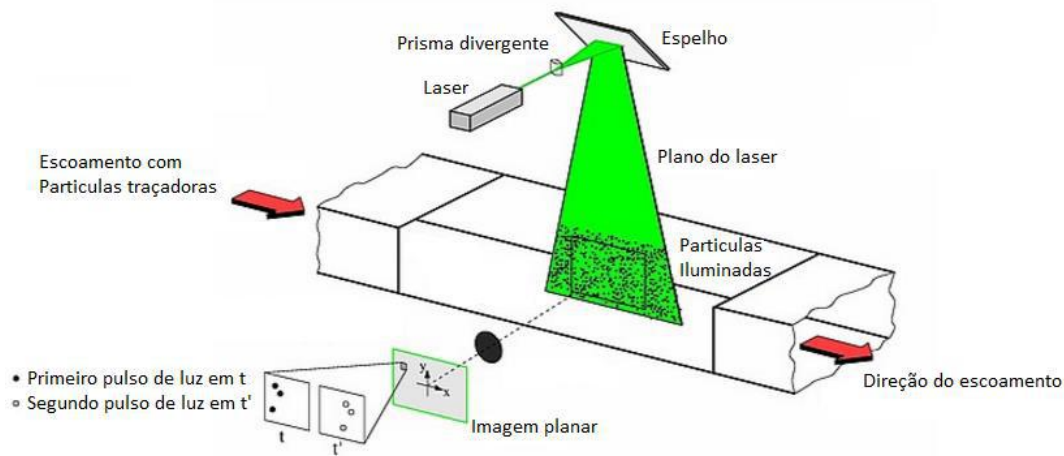


Figura 4.17: Esquema do princípio de funcionamento da técnica PIV reproduzido de RAFFEL *et al.* (2007).

Como principais características para esta técnica, pode-se ressaltar (RAFFEL *et al.*, 2007):

- medição de velocidade não intrusiva;
- medição indireta da velocidade do escoamento, pela determinação da velocidade de partículas;
- técnica não se restringe à medição de velocidade em um ponto específico do escoamento, mas a uma região do mesmo;
- possibilidade de determinação do vetor de velocidades do escoamento em três dimensões, através do uso de dois planos de iluminação e dois sistemas de aquisição de imagem;
- tamanho de partículas requer balanço entre capacidade de dispersão de luz (partículas grandes) e habilidade em seguir o escoamento (partículas pequenas);
- intervalo de tempo entre pulsos de iluminação deve ser adequado para a determinação do descolamento local das partículas sem permitir a entrada ou a saída de novas partículas da imagem registrada entre pulsos consecutivos;
- resolução espacial e temporal adequadas.

4.5 Procedimento Experimental

Nesta seção são descritos os procedimentos experimentais adotados para a realização deste trabalho, foram realizados ensaios de pressão, balanço mássico, somente PIV, somente *Shadow Sizing* e a combinação das técnicas de *Shadow Sizing* e PIV. O aparato foi operado de duas maneiras diferentes: monofásico, para a caracterização do experimento, e bifásico, para a caracterização da separação na junção T.

No que tange a ordem dos ensaios realizados, inicialmente, fez-se as medições utilizando a técnica de *Shadow Sizing* para escoamento bifásico, em seguida, foi adicionada as partículas de rodâmina e fez-se as medições de PIV para escoamento monofásico, posteriormente, utilizou-se as técnicas de visualização combinadas (*Shadow Sizing* e PIV) para o escoamento bifásico. Após os ensaios de visualização, a junção T dentro da caixa de acrílico foi substituída por uma junção com tomadas de pressão de mesmo material e geometria, onde foi possível realizar os ensaios de balanço mássico e, em seguida, os ensaios de pressão.

4.5.1 Monofásico

Inicialmente, foram feitas análises monofásicas somente com a fase líquida. Sendo de menor complexidade, o estudo monofásico foi realizado para validar as medições dos ensaios realizados.

Para os ensaios de pressão, trabalhou-se com vazões de líquido de 8,0 a 14,0 m^3/h , em passos de 0,5 m^3/h . As medições das pressões diferenciais foram realizadas com 4000 aquisições em um intervalo de 1,5 minutos para cada tomada de pressão por um medidor diferencial, além da aquisição da pressão absoluta da pressão nos pontos P01, P02, P16 e P28, adquiridas por 1 minuto com uma janela ativa de 85 %.

Os ensaios de visualização para o estudo monofásico se deu somente pelos ensaios de velocimetria por imagem de partículas, PIV. Para estes ensaios, escolhe-se a vazão de 11 m^3/h , onde foi possível realizar o alinhamento dos equipamentos e validar o tempo entre pulsos que melhor representa a velocidade do escoamento.

Para escolher o tempo ideal entre pulsos do laser, foi realizado um estudo com diferentes tempos: 300; 500; 600; 800; 833; 900; 1000 e 1200 μs , onde a frequência de aquisição de imagens foi de 15 Hz e para cada ensaio foram adquiridas 2010 imagens. Após a aquisição das imagens, utilizou-se a posição de um perfil como referência (perfil 4). Esse perfil 4 foi processado de três maneiras distintas utilizando a rotina de calibração *Adaptive PIV* do próprio *software Dynamic Studio*, onde, basicamente, foi modificado os tamanhos das janelas de processamento (máxima, mínima e redondezas). Para cada processamento, obteve-se um perfil de velocidade distinto que ao ser integrado resultou na vazão de líquido, esta foi comparada com a vazão real corrigida, e assim, eleito o melhor processamento, juntamente, com o

melhor tempo entre pulsos. Os parâmetros do processamento utilizado é ilustrado na Figura 4.18.

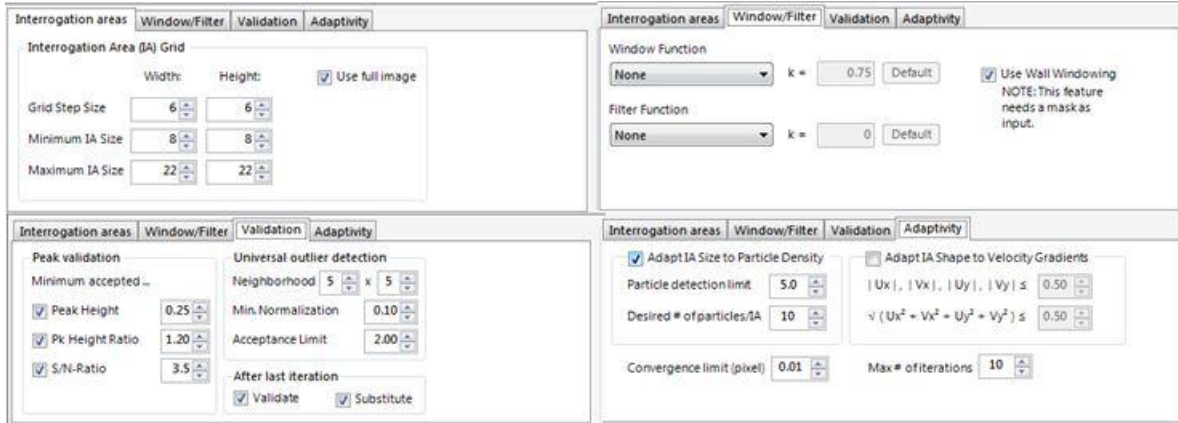


Figura 4.18: Parâmetros utilizados no processamento das imagens de PIV - *Adaptive PIV*

Vale a pena ressaltar que a análise de PIV não apresenta uma boa resolução próximo a parede da tubulação, assim para se obter o perfil de velocidade nesta região utilizou-se um cálculo pela aproximação por lei de potência (JOHNSON e BUSHNELL, 1969), definida na equação abaixo:

$$\frac{u_{Ly}}{u_{Lmax}} = \left(\frac{y}{R}\right)^{\frac{1}{n}}, \quad (4.3)$$

onde u_{Ly} é a velocidade da fase líquida na posição y , u_{Lmax} é a velocidade máxima da fase líquida, y a distância da parede da tubulação e R o raio da tubulação. Cada perfil de velocidade foi dividido em duas metade iguais, assim, sendo possível ajustar uma curva pela função *lsqcurvefit* em uma rotina de Matlab para buscar uma constante n para cada perfil.

Com o processamento e o tempo entre pulsos definidos (500 μs para avaliar o campo de velocidade no trecho inclinado e 1000 μs para avaliar o campo de velocidade na perna vertical), através do *software Dynamic Studio* foi possível achar perfis de velocidades para posições distintas da junção. A Figura 4.19 ilustra as posições onde foram calculados estes perfis.

4.5.2 Bifásico

Trabalhou-se com a fase líquida, água, e a fase gasosa, ar comprimido seco. Além dos ensaios de pressão e de visualização, também foram realizados ensaios de balanço mássico. Para os ensaios de pressão e balanço mássico, trabalhou-se com vazões mais altas de ar, comparadas com as vazões trabalhadas nos ensaios de

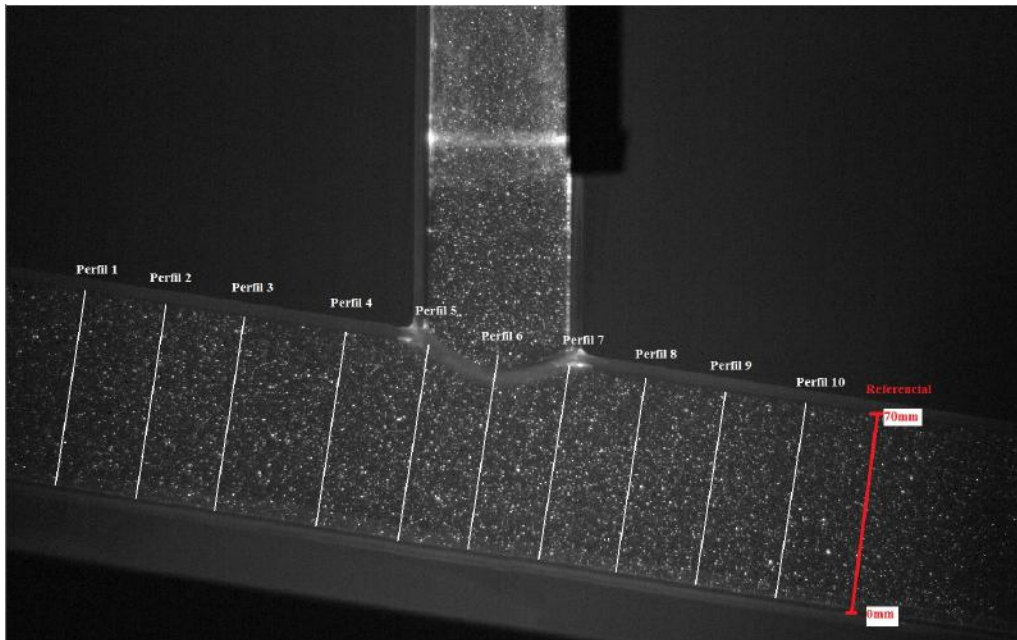


Figura 4.19: Posições dos perfis de velocidade para o estudo monofásico

visualização, esse fato se deve uma vez que com altas vazões de ar a detecção das bolhas no processamento das imagens se mostra ineficiente.

O procedimento inicial adotado na realização dos ensaios de pressão, balanço de massa e visualização é listado abaixo:

1. Verificar se baterias estão carregadas.
2. Verificar se os medidores de pressão estão zerados: Caso não estejam, verificar a existência de bolhas (para os que medem fase líquida) e zerar o medidor manualmente.
3. Ligar sistema de aquisição de dados - Programa *LabView* e *Picolog*.
4. Verificar coeficientes da calibração nos programas de aquisição de dados.
5. Verificar se sistema caixa 1 está ligado e configurado para a vazão desejada.
6. Ligar sistema de água na vazão desejada, garantindo que não haja fase gasosa na linha principal (trecho inferior 1 e 2).
7. Ligar sistema de ar comprimido: Secador e Compressor.
8. Ajuste de vazão da fase gasosa com correção da pressão e temperatura, até atingir vazão desejada para ensaio.
9. Esperar temperaturas e pressões estabilizarem para começar a realização dos ensaios.
10. Iniciar programa de aquisição de dados.

Ensaio de pressão e balanço mássico

Para os ensaios de pressão e balanço mássico utilizou-se diferentes vazões de líquido e de gás, aproximadamente de 8 a 14 m^3/h e de 1,7 a 7,5 m^3/h , respectivamente. Onde as pressões e temperaturas de cada condição de ensaio são apresentadas juntamente com suas incertezas no Apêndice C.

Os casos dessas vazões foram realizados com a limitação do sistema de drenagem da caixa separadora (caixa 1) no final do trecho 3. As vazões de gás foram devidamente corrigidas em relação a pressão e a temperatura da tubulação. Além desses casos, também foram avaliados casos com menores vazões de líquido (6 e 7 m^3/h), onde foi observado um comportamento transiente muito grande, onde o nível da coluna de líquido na perna vertical ficava abaixo dos pontos de pressão instalados, assim, impossibilitando a análise dos mesmos.

Para todas as vazões destes ensaios, o padrão de escoamento da entrada da junção T foi estratificado ondulado, gerando escoamento pistonado agitado na perna da junção e no trecho 2 um padrão de escoamento também estratificado agitado.

Para os ensaios do balanço mássico, foi feita a leitura visual do medidor padrão de gás na saída do trecho 3 (diafragma), uma vez que o mesmo não possui saída de sinal para aquisição de dados. Devido ao efeito transiente observado no fenômeno de separação na junção, o tempo de aquisição de dados foi de 5 minutos, com uma taxa de amostragem de 5 kHz e uma janela ativa de 85 %.

Para os ensaios de pressão, foram realizadas 4000 aquisições em um intervalo de 1,5 minutos para cada tomada de pressão com um medidor diferencial, além da aquisição da pressão absoluta da pressão nos pontos P01, P02, P16 e P28, adquiridas por 1 minuto com uma janela ativa de 85 %. As vazões de entrada de líquido e gás eram obtidas antes de cada medição de pressão por 1 minuto, com a mesma taxa de amostragem e janela ativa utilizado nos ensaios de balanço mássico e pressão absoluta.

Ensaio de visualização

O Sistema de medição por Sombra (*Shadow Sizer System*), da *DANTEC Dynamics*, foi utilizado para quantificar a distribuição dos tamanhos de bolha na fase líquida a jusante da junção do tipo T (trecho 2), área de interesse ilustrada na Figura 4.20.

Para este tipo de medição, um difusor de luz foi utilizado entre a caixa de acrílico e a fonte de luz, para se obter uma iluminação uniforme em toda a superfície, sem atingir a mesma diretamente. A intensidade dos LEDs e a abertura da lente são ajustadas para que a imagem capturada não apresente sobre ou sub-exposição, fazendo com que todas as regiões da imagem estejam nítidas. O *software* utilizado

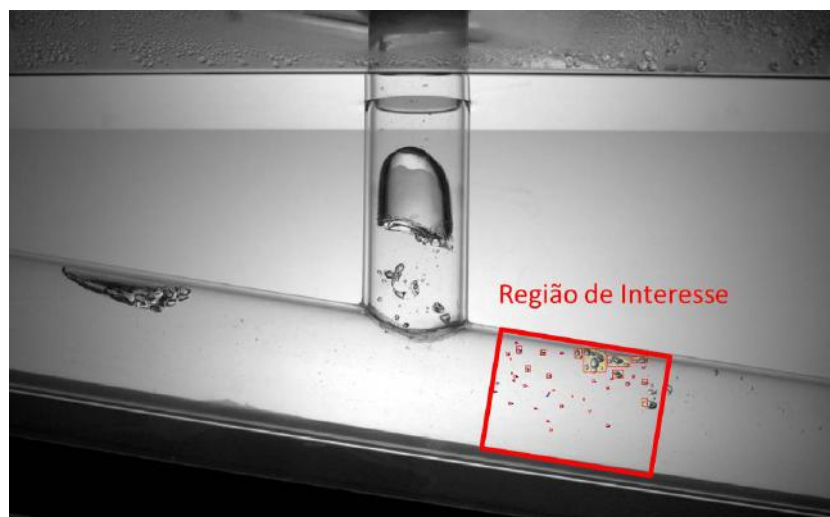
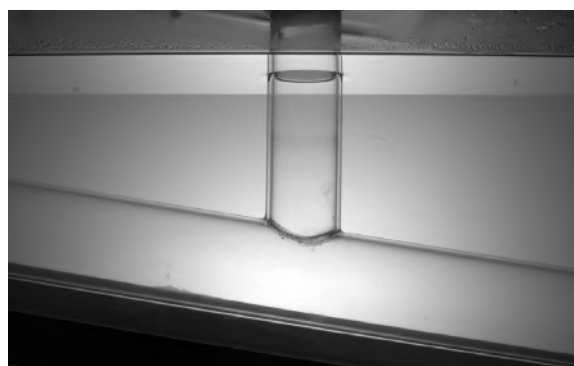
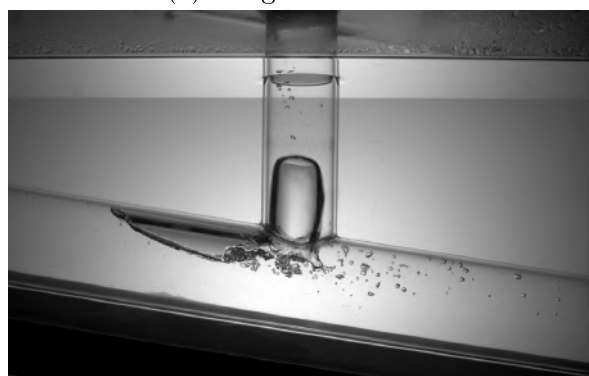


Figura 4.20: Região de interesse da análise de *Shadow Sizer* - fase não separada.

permite fazer uma mudança de sistema de coordenadas em pixels para o sistema métrico, mediante a um processo de calibração por escala. As dimensões das imagens são calibradas a partir de uma escala previamente conhecida, usou-se por base o diâmetro externo do tubo vertical da junção T. Feito esses ajustes, faz-se a captação de 1000 imagens características de fundo (sistema monofásico) com frequência de 500 Hz , antes de se iniciar os ensaios bifásicos (Figura 4.21).



(a) Imagem de Fundo



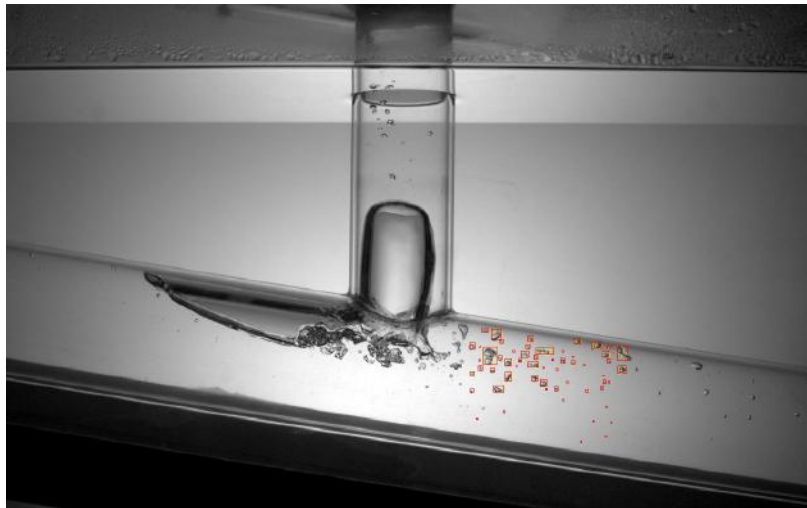
(b) Exemplo de imagem para processar

Figura 4.21: Exemplo da etapa inicial do processamento.

Após a aquisição dos ensaios bifásicos faz-se o pós-processamento das imagens adquiridas com uma rotina utilizando o *MatLab*, a mesma se encontra no apêndice A. O objetivo desta rotina é fazer o reconhecimento da fase gasosa no sistema, onde mediante a aplicação de filtros e a subtração da imagem característica de fundo (imagem da tubulação preenchida somente com água) gerar um maior contraste entre as bolhas, para assim, binarizar a imagem, tendo como resultado um fundo branco e bolhas pretas (Figura 4.22a). Este processamento é baseado em algoritmos de detecção de contorno, que juntamente com o *software* da *Dantec Dynamics* fornece como resultados diâmetro equivalente, área, perímetro, bem como vetores de velocidade para cada bolha medida, imagem processada ilustrada na Figura 4.22b.



(a) Fase gasosa binarizada pela rotina de *MatLab*



(b) Exemplo de imagem processada

Figura 4.22: Exemplo da etapa final do processamento.

Nos ensaios de visualização com a técnica de *Shadow Sizing* trabalhou-se com diferentes vazões de gás e líquido, e suas respectivas temperaturas, pressões, frequências e tempo de aquisição listadas na Tabela 4.1. A temperatura e pressão da fase

gasosa na entrada do sistema foram medidas próximo ao medidor de gás (antes da injeção). Para a fase líquida, o ponto de medição da temperatura estava localizado próximo ao ponto de pressão P13 e a medição da pressão foi realizada no ponto P01.

Conforme se alterou as vazões das fases, utilizou-se frequências distintas de aquisição para melhor visualizar o fenômeno da separação na junção, além do fato de que tempos menores de frequência foram utilizados para caracterizar quantitativamente e qualitativamente a passagem de bolhas. Esta análise foi realizada implementando uma rotina do *MatLab* (também baseada em um algoritmo de detecção de contorno) utilizada no estudo de MATAMOROS *et al.* (2013), sendo possível assim, caracterizar as bolhas na entrada da junção T (volume, área seca, área molhada, velocidade e comprimento).

Para estas vazões observou-se padrões de escoamento distintos na entrada da junção T, os mesmos são ilustrados nas Figuras 4.23 e 4.24, a quantificação dos tamanhos das bolhas e pistões da entrada estão listadas na Tabela 4.2.

As Figuras 4.25 e 4.26 mostram os perfis de escoamento próximo a junção T para os casos citados na Tabela 4.2.

A fim de isolar os efeitos das bolhas na fase contínua para a determinação do campo de velocidade em um escoamento bifásico, faz-se necessário a combinação de duas técnicas de visualização: a velocimetria por imagem de partícula, PIV, e a técnica de *Shadow Sizing* (Figura 4.27). Para estes ensaios, trabalhou-se com os mesmos casos de vazões e o mesmo sistema de aquisição de imagens do *Shadow Sizing*, e como já citado anteriormente, foi posto um filtro na lente da câmera, assim sendo possível captar a imagem das bolhas juntamente com a identificação de partículas. As partículas foram iluminadas por um plano *laser*, perpendicular ao eixo da câmera e que passa pelo eixo da tubulação inclinada. Os dados obtidos são processados pelo *software Dynamics Studio* já mencionado no ensaio monofásico.

Para as vazões testadas, o tempo entre pulsos do laser foi de 500 e 1000 μs , a frequência de aquisição de imagens foi de 15 Hz, para cada ensaio foram adquiridas 2010 imagens. A configuração completa do PIV está no Apêndice B.

Tabela 4.1: Parâmetros adotados nos ensaios de *Shadow Sizing*

Q_{G1} [m^3/h]	T_{ar} [$^{\circ}C$]	P_{ar} [bar]	Q_{L1} [m^3/h]	T_{Tub} [$^{\circ}C$]	P_{Tub} [bar]	Frequência Aquisição [Hz]	Tempo Medição [s]
0,12	25,48	1,08	11,19	26,95	1,10	100	20,10
0,12	25,48	1,08	11,19	26,95	1,10	100	20,10
0,12	25,50	1,08	11,19	26,98	1,10	100	20,10
0,12	25,55	1,08	11,19	27,05	1,10	100	20,10
0,12	26,01	1,08	11,19	27,11	1,10	100	20,10
0,12	26,31	1,08	11,19	27,48	1,10	300	6,70
0,12	26,46	1,08	11,19	27,54	1,10	300	6,70
0,12	26,53	1,08	11,19	27,60	1,10	300	6,70
0,13	24,00	1,02	6,07	27,90	1,01	250	8,04
0,12	23,90	1,02	6,07	27,95	1,01	300	6,70
0,12	23,90	1,02	6,07	27,96	1,01	300	6,70
0,12	25,33	1,09	11,19	26,45	1,10	450	4,47
0,12	25,44	1,09	11,19	26,56	1,10	450	4,47
0,06	25,39	1,05	10,09	27,62	1,08	400	5,03
0,06	25,37	1,05	10,09	27,71	1,08	400	5,03
0,06	25,39	1,05	10,09	27,81	1,08	400	5,03
0,12	24,70	1,07	10,09	27,93	1,09	430	4,67
0,12	24,94	1,07	10,09	28,03	1,09	430	4,67
0,12	25,21	1,07	10,09	28,12	1,09	430	4,67
0,17	25,01	1,08	10,09	28,23	1,09	500	4,02
0,17	24,81	1,08	10,09	28,29	1,09	500	4,02
0,17	24,84	1,08	10,09	28,36	1,09	500	4,02
0,24	25,04	1,11	10,09	28,47	1,10	580	3,47
0,24	24,95	1,11	10,09	28,52	1,11	580	3,47
0,24	25,12	1,11	10,09	28,57	1,10	580	3,47
0,12	24,09	1,14	13,65	26,38	1,15	580	3,47
0,12	24,17	1,14	13,65	26,51	1,15	580	3,47
0,12	24,29	1,14	13,65	26,63	1,15	580	3,47
0,12	24,47	1,04	8,05	28,02	1,05	400	5,03
0,12	24,40	1,04	8,05	28,42	1,06	400	5,03
0,12	24,65	1,04	8,05	28,07	1,06	400	5,03

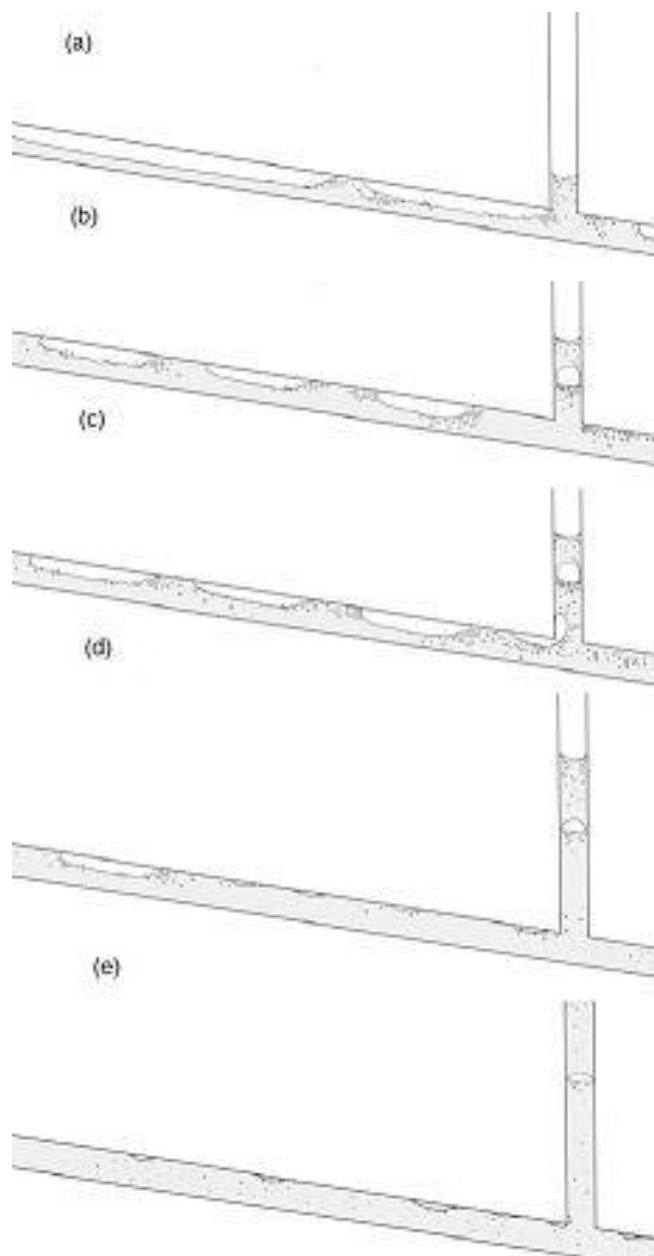


Figura 4.23: Padrões de Escoamento antes da junção T para os ensaios de visualização. Sendo (a) Caso 1, (b) Caso 2, (c) Caso 3, (d) Caso 4 e (e) Caso 5.

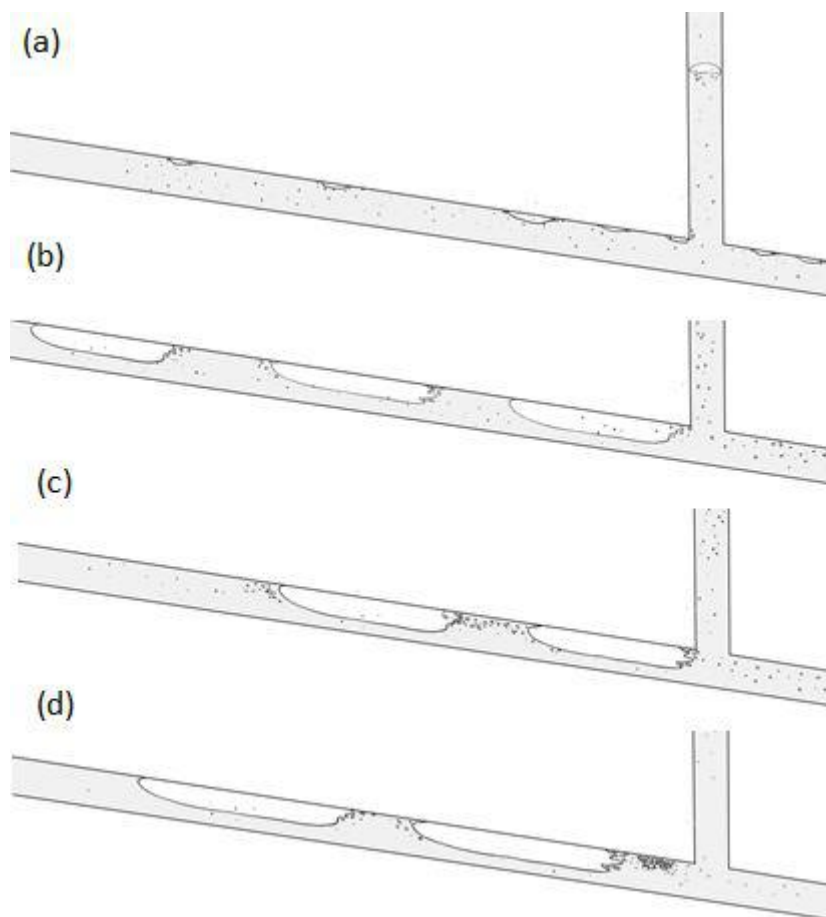


Figura 4.24: Padrões de Escoamento antes da junção T para os ensaios de visualização. Sendo (a) Caso 6, (b) Caso 7, (c) Caso 8 e (d) Caso 9.

Tabela 4.2: Caracterização do Padrão de Escoamento para Ensaios de visualização

$Q_{G1} \approx 0,13 \text{ m}^3/h$						
Caso	Q_{L1} (m^3/h)	1º Bolha (cm)	1º Pistão (cm)	2º Bolha (cm)	2º Pistão (cm)	3º Bolha (cm)
1	6,07	386	30	218 (até a junção)	-	-
2	8,05	132	43	117	43	90 (até a junção)
3	10,09	112	58	101	63	177 (até a junção)
4	11,19	91	-	-	-	-
5	13,65	-	-	-	-	-
$Q_{L1} \approx 10,09 \text{ m}^3/h$						
Caso	Q_{G1} (m^3/h)	1º Bolha (cm)	1º Pistão (cm)	2º Bolha (cm)	2º Pistão (cm)	3º Bolha (cm)
6	0,07	-	-	-	-	-
7	0,13	112	58	102	63	117 (até a junção)
8	0,20	145	58	132	-	-
9	0,27	168	58	178	-	-

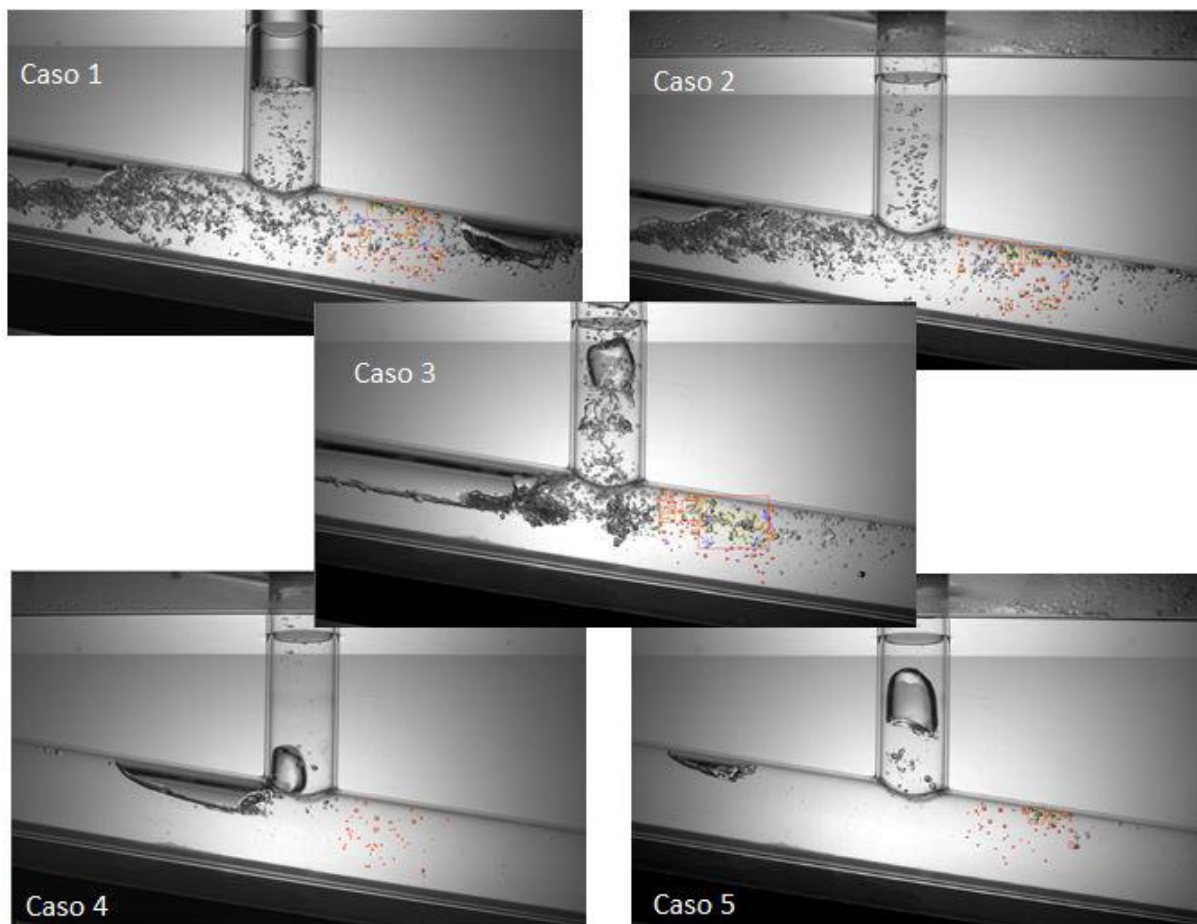


Figura 4.25: Perfil de escoamento próximo a junção T para os casos de 1 a 5.

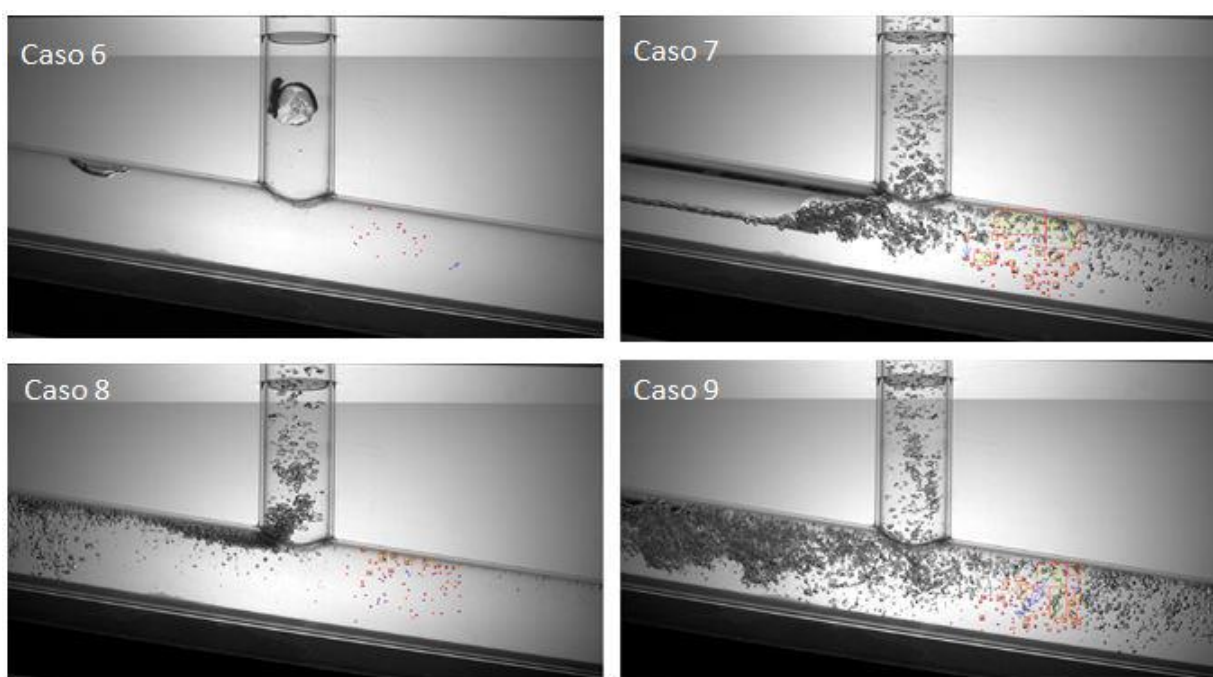


Figura 4.26: Perfil de escoamento próximo a junção T para os casos de 6 a 9



Figura 4.27: Exemplo da combinação da técnica de *Shadow Sizing* mais PIV.

4.5.3 Operação do Sistema Caixa Separadora - Caixa 1

O objetivo da caixa separadora, caixa 1, é realizar a separação das fases líquida e gasosa pelo método gravitacional. O sistema desta caixa existe para que o nível de líquido na mesma seja constante, assim, não aumentando a pressão na caixa e, consequentemente, não afetando a separação na junção. A operação do sistema da caixa separadora (Figura 4.8) é detalhada nos itens abaixo:

- Controle do nível da caixa 1 (caixa separadora):
 1. Controle do nível com baixa vazão de água (gravidade):
 - (a) Ajustar a chave da caixa controladora para o modo “gravidade”;
 - (b) Ajustar a chave da caixa de sensor para o modo “baixa vazão”;
 - (c) Verificar se as válvulas de PVC Ve1, Ve2, Ve10 e Ve5 estão abertas e se Ve3 e Ve4 estão fechadas (ver Figura na próxima página);
 - (d) Ligar a caixa controladora.
 2. Controle de nível com média vazão de água:
 - (a) Ajustar a chave da caixa controladora para o modo “bomba”;
 - (b) Ajustar a chave da caixa seletora de sensor para o modo “alta vazão”;
 - (c) Verificar se a bomba 1 de média vazão (MV) está com sua chave no modo “ligado”;
 - (d) Verificar se a bomba 1 (MV) se encontra em sua tomada;
 - (e) Verificar se as válvulas esfera de PVC Ve1, Ve2, Ve3, Ve7, Ve8 e Ve10 estão abertas e se Ve4, Ve5 e Ve9 estão fechadas;
 - (f) Ligar a caixa controladora.
 3. Controle de nível com alta vazão de água:

- (a) Ajustar a chave da caixa controladora para o modo “bomba”;
- (b) Ajustar a chave da caixa seletora de sensor para o modo “alta vazão”;
- (c) Verificar se a bomba 1 de alta vazão (AV) está com sua chave no modo “ligado”;
- (d) Verificar se a bomba 1 (AV) se encontra em sua tomada;
- (e) Verificar se as válvulas esfera de PVC Ve1, Ve2, Ve3, Ve9 e Ve10 estão abertas e se Ve4, Ve5, Ve7 e Ve8 estão fechadas;
- (f) Ligar a caixa controladora.

- Controle do nível da caixa 2:

1. Verificar se a bomba 2 está com sua chave no modo “ligado”;
2. Verificar se a bomba 2 se encontra em sua tomada;
3. Verificar se a válvula manual Ve6 está aberta;
4. Ligar a caixa controladora.

Capítulo 5

Análise de Incertezas

Para as análises dos resultados de ensaios experimentais é importante ter a confiabilidade de todos os dados obtidos através das medições. A confiabilidade desses dados é obtida por meio da calibração dos instrumentos e pela quantificação das incertezas de medições associadas.

Foram feitas as modelagens matemáticas de cada instrumento e as incertezas de medições foram calculadas de acordo com a metodologia proposta em GUM (2008). Para este estudo todos os componentes de sistema de aquisição de dados foram calibrados e as modelagens serão apresentadas a seguir.

A confiabilidade das medições de grandezas relativas ao fenômeno em estudo é fundamental para o resultado do mesmo. Sendo assim, os instrumentos e equipamentos utilizados devem estar calibrados, serem utilizados de forma correta e feitas as correções das grandezas de influências nos mesmos.

A calibração de instrumentos envolve o conjunto de operações que compara o resultado da medição com um valor de referência da grandeza. No certificado de calibração devem estar declarados o fator de correção da indicação e sua incerteza de medição associada.

5.1 Conceitos Fundamentais

Quando se expressa um resultado de medição de uma grandeza deve-se dar alguma indicação quantitativa da qualidade do resultado, de forma que aqueles que o utilizam possam avaliar sua confiabilidade. Sem essa indicação, resultados de medição não podem ser comparados, seja entre eles mesmos ou com valores de referência.

Nos dias de hoje, é necessário um parâmetro que caracterize essa dispersão do resultado de medição. A incerteza possibilita a comparabilidade das medições e é particularmente útil ao cliente na tomada de decisões. Quando há um limite de tolerância máximo/mínimo para o mensurando, seja ele estabelecido por uma

legislação ou de alguma outra forma, a incerteza é essencial para a interpretação correta do resultado da medição.

Segundo BIPM *et al.* (2008), define-se incerteza de medição como o parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando, com base nas informações utilizadas.

A incerteza de medição inclui componentes provenientes de efeitos sistemáticos, tais como componentes associadas a correções e a valores atribuídos a padrões, assim como, a incerteza definicional (Nota 1). Algumas vezes não são corrigidos efeitos sistemáticos estimados, mas ao invés disso, são incorporadas componentes de incerteza de medição associadas.

O parâmetro pode ser, por exemplo, um desvio-padrão denominado incerteza padrão (ou um de seus múltiplos) ou a metade da amplitude de um intervalo tendo uma probabilidade de abrangência determinada (Nota 2).

A incerteza de medição geralmente engloba muitas componentes. Algumas delas podem ser estimadas por uma avaliação do Tipo A da incerteza de medição, a partir da distribuição estatística dos valores provenientes de séries de medições e podem ser caracterizadas por desvios-padrão (Nota 3). As outras componentes, as quais podem ser estimadas por uma avaliação do Tipo B da incerteza de medição, podem também ser caracterizadas por desvios-padrão estimados a partir de funções de densidade de probabilidade baseadas na experiência ou em outras informações.

Geralmente, para um dado conjunto de informações, subentende-se que a incerteza de medição está associada a um determinado valor atribuído ao mensurando (Nota 4). Uma modificação deste valor resulta numa modificação da incerteza associada.

A avaliação da incerteza de medição pode ser caracterizada de duas formas:

- Incerteza tipo A: usa-se a análise estatística de uma série de medições.
- Incerteza tipo B: a incerteza padrão é obtida por certificados de medição, manuais ou dados provenientes de calibração, especificações de fabricantes e experiência.

Para se caracterizar as incertezas também se deve ter conhecimento do conceito de erros. Os erros associados à medição são definidos como a diferença entre o valor medido e o valor verdadeiro, normalmente desconhecido. O erro total possui duas componentes: um erro aleatório e um erro sistemático. O erro aleatório é dado pelo desvio padrão, também conhecido como erro de precisão, esses erros são observados em medições repetidas, as quais não são, e não se espera que sejam exatamente iguais devido as numerosas fontes que influenciam no valor medido. Já por sua vez, o erro sistemático pode ser proveniente do observador e/ou instrumentos usados de forma incorreta (SILVA FREIRE *et al.*, 2006).

5.2 Procedimento de Cálculo de Incertezas

Um procedimento muito utilizado na organização do raciocínio para o cálculo de incertezas é o diagrama de Ishikawa ou diagrama de causa e efeito. Este diagrama apresenta uma estrutura com níveis para detalhes primários e secundários, nos quais as principais fontes de incerteza são enfatizadas. O procedimento para o cálculo da incerteza de medição é resumido pela sequência a seguir:

- 1º Expressar matematicamente a dependência da grandeza de saída em relação às grandezas envolvidas;
- 2º Identificar e aplicar as correções significativas;
- 3º Relacionar todas as fontes de incerteza na forma de uma análise de incertezas;
- 4º Calcular a incerteza padrão para as grandezas obtidas através de estatísticas;
- 5º Para valores individuais, ou fontes externas, adotar os valores fornecidos, caso seja satisfatório utilizar recomendações com base científica;
- 6º Identificar os valores de cada parcela das contribuições individuais ou correlacionadas;
- 7º Calcular a incerteza expandida;
- 8º Expressar o resultado acompanhado com a estimativa de saída e a expressão da incerteza expandida e o fator de abrangência k .

Dessa forma, uma vez determinado o modelo matemático aplicado para a declaração da incerteza do instrumento, são analisadas as grandezas de influência, a incerteza envolvida para cada grandeza e seu instrumento padrão utilizado. Determina-se o coeficiente de sensibilidade (C_i) para cada grandeza envolvida (X_i) a partir das derivadas parciais das mesmas, onde F é função do modelo em questão:

$$C_i = \frac{\partial F}{\partial X_i} \quad (5.1)$$

Em seguida, sabendo o número de grandezas de influência (N) e o grau de liberdade de cada grandeza dessas, calcula-se a contribuição da incerteza: incerteza combinada (U_c) e o grau de liberdade efetivo (ν_{eff}):

$$U_c = \sqrt{\sum_{i=1}^N U_i^2 C_i^2} \quad (5.2)$$

$$\nu_{eff} = \frac{U_c^4}{\sum_{i=1}^N \frac{(U_i C_i)^4}{\nu_i}} \quad (5.3)$$

onde u_i é a incerteza da grandeza envolvida i e ν_i representa os graus de liberdade do fator de incerteza i . De posse desses valores, determinar o fator de abrangência

k (corresponde a uma probabilidade de abrangência de 95,45%), de acordo com a tabela 5.1.

Tabela 5.1: Valor de k em função do valor de ν_{eff} calculado, considerando probabilidade de abrangência de 95,45%

ν_{eff}	k	ν_{eff}	k
1	13,97	15	2,18
2	4,53	20	2,13
3	3,31	25	2,11
4	2,87	30	2,09
5	2,65	35	2,07
6	2,52	40	2,06
7	2,43	50	2,05
8	2,37	100	2,03
9	2,32	∞	2
10	2,28		

Em seguida, calcula-se a incerteza expandida, U , pelo produto de k com a incerteza combinada, U_c .

$$U = kU_c \quad (5.4)$$

Para os estudos de visualização, assim como no trabalho de GUERRA (2017), foi utilizado o conceito de variância $\bar{\sigma}^2$, uma medida da dispersão dos valores de uma variável aleatória z em torno de sua média μ , onde esta pode ser representada, para uma amostra de certa população que segue a distribuição normal, por $\bar{\sigma}^2 = \sigma^2/n$, sendo n o tamanho da amostra (SPIEGEL *et al.*, 2016). Desta forma, a incerteza referente à distribuição de uma amostra com estas características pode ser estimada por seu desvio padrão $\bar{\sigma}$, representado por:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (5.5)$$

Esta estimativa de incerteza foi utilizada, na forma de barras de erro, para os perfis de velocidade, dados pelo *software Dynamics Studios*, exibidos neste trabalho.

Para se determinar as incertezas das medições de um experimento, é de crucial importância determinar anteriormente as incertezas de calibração de cada equipamento/instrumento utilizado. Neste trabalho, todos componentes do sistema foram calibrados e seus respectivos certificados de calibração foram emitidos. A seguir serão descritos os modelos adotados para o cálculo das incertezas de medição desse estudo.

5.3 Incerteza da Medição de Vazão de Líquido

A vazão de líquido de entrada para os ensaios de balanço mássico foi calculada pela diferença de volume totalizado, $V_f - V_i$, dividido pelo tempo de cada ensaio (t igual a 5 minutos), já para os ensaios de visualização, como o tempo é inferior, a vazão foi obtida pela indicação do próprio medidor (considerando sua oscilação). Estas vazões, Q_i , foram corrigidas por um fator, f_{mc} descrito no certificado de calibração do medidor. Sendo assim, dois modelos teóricos para o cálculo da incerteza de medição foram desenvolvidos.

- Modelo Teórico - Balanço Mássico:

$$Q = f_{mc} \times Q_i \quad (5.6)$$

onde,

$$Q_i = \left(\frac{V_f - V_i}{t} \right) \quad (5.7)$$

$$f_{mc} = \sum_{i=1}^4 a_i \left(\frac{V_f - V_i}{t} \right)^i \quad (5.8)$$

Este modelo resultou nas incertezas apresentadas na Tabela 5.2.

Q_L [m ³ /h]	U [m ³ /h]	u_c [m ³ /h]	Fator de abrang. K	ν_{eff}	Incert. exp. relativa
8,00	0,1759	0,0863	2,04	68	2,198%
9,00	0,1933	0,0947	2,04	61	2,147%
10,00	0,2131	0,1042	2,04	58	2,131%
12,00	0,2627	0,1286	2,04	60	2,189%
13,00	0,2946	0,1444	2,04	64	2,267%
14,00	0,3332	0,1636	2,04	71	2,380%

Tabela 5.2: Demonstrativo do cálculo de incertezas para as medições de vazão de líquido utilizadas no ensaios de balanço mássico.

- Modelo Teórico - Ensaios de Visualização:

Também utiliza-se a Equação 5.6, onde Q_i é a indicação média da vazão do instrumento. Para o cálculo da incerteza, adicionalmente, deve-se levar em consideração o erro devido à flutuação da vazão.

Este modelo resultou nas incertezas apresentadas na Tabela 5.3.

Q_L [m ³ /h]	U [m ³ /h]	u_c [m ³ /h]	Fator de abrang. K	ν_{eff}	Incert. exp. relativa
6,00	0,1524	0,0754	2,02	122	2,540%
8,00	0,1762	0,0865	2,04	68	2,202%
10,00	0,2836	0,1409	2,01	195	2,836%
11,00	0,2946	0,1461	2,02	149	2,678%
13,00	0,3221	0,1589	2,03	94	2,478%

Tabela 5.3: Demonstrativo do cálculo de incertezas para as medições de vazão de líquido utilizadas no ensaios de visualização.

5.4 Incerteza da Medição de Vazão de Gás

O modelo para o cálculo da incerteza de medição da vazão de gás considera a correção pela pressão, temperatura, fator de calibração, adicionalmente, as suas respectivas incertezas, assim como, a incerteza da oscilação da variação da vazão instantânea ($\delta Q_{G_{inst}}$) devido a janela de aquisição de dados do programa de medição, este modelo é apresentado na equação:

$$Q_{G_i} = \frac{Q_{G_{med}} \times P_i \times T_{tub} \times f_{Q_{G_i}}}{P_{tub} \times T_i} + \delta Q_{G_{inst}} \quad (5.9)$$

Devido ao fenômeno intermitente observado na perna vertical da junção, o medidor tipo vórtex do trecho 3 apresentou uma incerteza de medição alta comparada com a incerteza de medição do medidor tipo diafragma, assim, para os ensaios realizados, os valores medidos considerados foram os valores do medidor padrão diafragma, cujo $Q_{G_{med}}$ e f_{mc} são dado por equações similares as equações 5.7 e 5.8. Onde $Q_{G_{med}}$ é definido como sendo a vazão de gás não corrigida pela pressão e temperatura da tubulação (vazão de gás medida).

Estes modelos resultaram em incertezas representadas nas Tabelas 5.4, 5.5 e 5.6.

- Medidor Entrada - Vórtex

Q_{G1} [m ³ /h]	U [m ³ /h]	U_c [m ³ /h]	Fator de abrang. K	ν_{eff}	Incert. exp. relativa
1,00	0,0687	0,0327	2,11	26	6,874%
2,00	0,1338	0,0631	2,12	22	6,689%
3,00	0,1999	0,0940	2,13	22	6,664%
4,00	0,2659	0,1251	2,13	22	6,649%
5,00	0,3321	0,1562	2,13	21	6,641%
6,00	0,3982	0,1873	2,13	21	6,637%
7,00	0,4645	0,2184	2,13	21	6,635%

Tabela 5.4: Incerteza para as medições de gás com medidor Vórtex - Trecho 1.

- Medidor Entrada - Rotâmetro

Q_{G1} [m ³ /h]	U [m ³ /h]	U_c [m ³ /h]	Fator de abrang. K	ν_{eff}	Incert. exp. relativa
1,00	0,0356	0,0178	2,00	3.536	3,557%
2,00	0,0548	0,0274	2,00	1.247	2,740%
3,00	0,0804	0,0402	2,00	1.143	2,682%
4,00	0,1069	0,0535	2,00	1.129	2,673%

Tabela 5.5: Incerteza para as medições de gás com medidor rotâmetro - Trecho 1.

- Medidor Perna Vertical - Diafragma

Q_{G3} [m ³ /h]	U [m ³ /h]	U_c [m ³ /h]	Fator de abrang. K	ν_{eff}	Incert. exp. relativa
1,20	0,1507	0,0754	2,00	490.079	12,560%
2,40	0,1576	0,0788	2,00	46.691	6,567%
3,60	0,1685	0,0842	2,00	12.217	4,680%
4,80	0,1826	0,0913	2,00	5.347	3,804%
6,00	0,1993	0,0996	2,00	3.109	3,321%
7,20	0,2179	0,1090	2,00	2.145	3,027%

Tabela 5.6: Incerteza para as medições de gás com medidor Diafragma - Trecho 3.

5.5 Incerteza da Medição de Temperatura

A aquisição da temperatura no aparato se deu através de termopares pontuais, onde a aquisição de dados foi realizada através de uma placa de aquisição de dados, *Picolog*, cujo fator de correção dado na calibração estava aplicado aos valores brutos na aquisição da temperatura. Sendo assim, o modelo para cálculo de incerteza é:

$$T = T_i + \delta T_{cal} + \delta T_{esp} + \delta T_{flut} \quad (5.10)$$

onde δT_{cal} é o erro devido ao ajuste da curva de calibração (seu valor é zero, porém sua incerteza não), δT_{esp} é o erro devido a medição da temperatura em um único ponto da tubulação e δT_{flut} é o erro devido a flutuação da temperatura no tempo de medição. Este modelo resultou em incertezas menores que 1%, na Tabela 5.7 é apresentada a incerteza para diferentes temperaturas, onde não houve uma variação da incerteza.

T_i [°C]	U [°C]	U_c [°C]	Fator de abrang. K	ν_{eff}	Incert. exp. relativa em Kelvin
20,00	0,17	0,0856	2,00	∞	0,058%
22,00	0,17	0,0856	2,00	∞	0,058%
25,00	0,17	0,0856	2,00	∞	0,057%
28,00	0,17	0,0856	2,00	∞	0,057%
30,00	0,17	0,0856	2,00	∞	0,056%

Tabela 5.7: Demonstrativo do cálculo de incertezas para as medições de temperatura.

5.6 Incerteza da Medição de Pressão

A aquisição das medidas de pressão é dada de forma similar ao da temperatura, onde o fator de correção foi aplicado nos valores brutos adquiridos no sistema de aquisição de dados, assim, segue o modelo adotado:

$$P = P_i + \delta P_{pad} + \delta P_{cal} \quad (5.11)$$

onde δP_{pad} é o erro do medidor padrão e δP_{cal} é o erro devido ao ajuste da curva de calibração. Este modelo resultou em incertezas apresentadas nas Tabelas 5.8, 5.9, 5.10, 5.11 e 5.12:

- P gás entrada

P_i [bar]	U [bar]	U_c [bar]	Fator de abrang. K	ν_{eff}	Incert. exp. relativa
0,500	0,014	0,0070	2,01	278	2,817%
0,700	0,014	0,0070	2,01	278	2,012%
0,900	0,014	0,0070	2,01	278	1,565%
1,000	0,014	0,0070	2,01	278	1,409%
1,200	0,014	0,0070	2,01	278	1,174%

Tabela 5.8: Incerteza para a medição de pressão absoluta na entrada de gás.

- P gás saída perna vertical

P_i [bar]	U [bar]	U_c [bar]	Fator de abrang. K	ν_{eff}	Incert. exp. relativa
0,030	0,0033	0,0016	2,08	34	11,002%
0,050	0,0033	0,0016	2,08	34	6,601%
0,060	0,0033	0,0016	2,08	34	5,501%

Tabela 5.9: Incerteza para a medição de pressão absoluta na caixa 1.

- P absoluto Tubulação

P_i [bar]	U [bar]	U_c [bar]	Fator de abrang. K	ν_{eff}	Incert. exp. relativa
0,150	0,0107	0,0051	2,09	30	7,102%
0,080	0,0107	0,0051	2,09	30	13,316%
0,120	0,0107	0,0051	2,09	30	8,877%
0,200	0,0107	0,0051	2,09	30	5,326%

Tabela 5.10: Incerteza para a medição de pressão absoluta na tubulação.

- P diferencial Tubulação

P_i [mbar]	U [mbar]	U_c [mbar]	Fator de abrang. K	ν_{eff}	Incert. exp. relativa
50,000	0,2945	0,1364	2,16	17	0,589%
100,000	0,2945	0,1364	2,16	17	0,294%
200,000	0,2945	0,1364	2,16	17	0,147%
300,000	0,2945	0,1364	2,16	17	0,098%

Tabela 5.11: Incerteza para a medição de pressão diferencial da tubulação.

- P diferencial Junção T

P_i [mbar]	U [mbar]	U_c [mbar]	Fator de abrang. K	ν_{eff}	Incert. exp. relativa
10,000	0,3150	0,1297	2,43	8	3,150%
30,000	0,3150	0,1297	2,43	8	1,050%
50,000	0,3150	0,1297	2,43	8	0,630%
80,000	0,3150	0,1297	2,43	8	0,394%

Tabela 5.12: Incerteza para a medição de pressão diferencial da junção T.

Capítulo 6

Resultados

A seguir serão apresentados os resultados obtidos para este trabalho para os experimentos monofásico e bifásico, respectivamente.

6.1 Monofásico

6.1.1 Condições Experimentais

O estudo monofásico foi realizado com a escolha da fase líquida, onde foram utilizadas diferentes valores de vazão para avaliar o padrão de escoamento na junção T e no próprio aparato experimental. Trabalhou-se com vazões de líquido de 8,0 a 14,0 m^3/h em passos de 0,5 m^3/h para a avaliação da pressão, e para os ensaios de visualização trabalhou-se com somente uma vazão de 11 m^3/h , onde foi realizado o alinhamento do sistema de medição e a validação do tempo entre pulsos utilizado no sistema de velocimetria por partícula - PIV.

6.1.2 Medições de Pressão

A localização dos pontos de pressão foram ilustradas anteriormente nas Figuras 4.12 e 4.13. A Figura 6.1 apresenta um desenho esquemático do sistema de coordenadas e referenciais de comprimentos adotados nos resultados, sendo o eixo x a coordenada longitudinal ao longo do comprimento da tubulação: o marco zero do eixo x é o centro da junção T, nas proximidades do marco 2,6 m, se dá o fim do trecho inclinado e início do trecho horizontal e nas proximidades do marco 6,0 m ocorre a redução de diâmetro da tubulação. Os resultados da pressão absoluta ao longo da tubulação (trecho inclinado e horizontal) para as diferentes vazões de líquido utilizadas é apresentado na Figura 6.2.

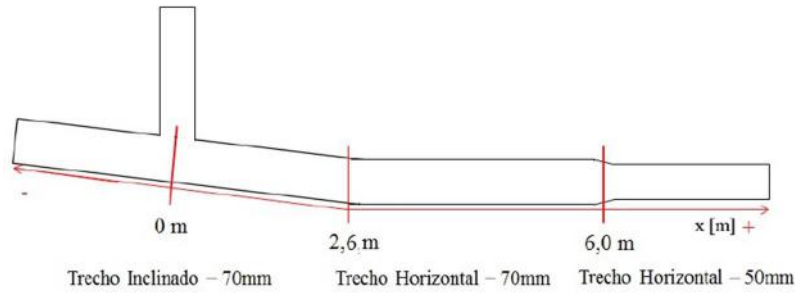


Figura 6.1: Desenho esquemático com coordenadas e referências de comprimento adotados

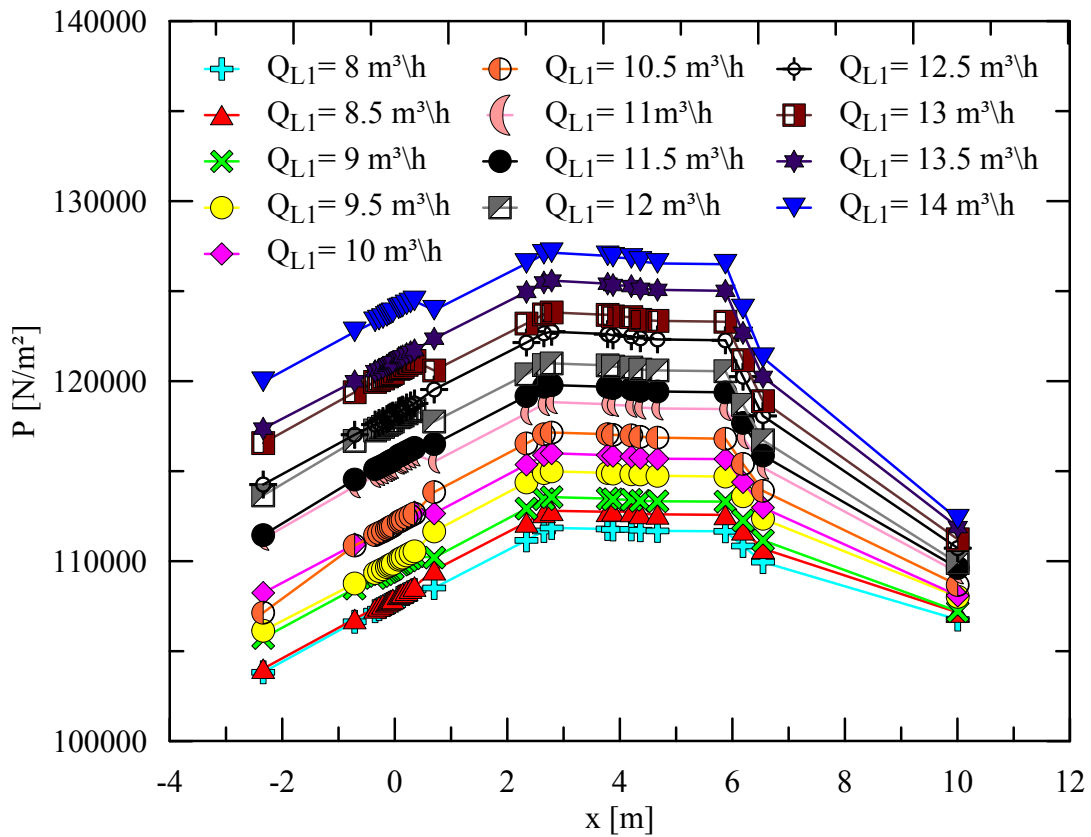


Figura 6.2: Distribuição da pressão no aparato experimental

Como se pode observar, quanto maior a vazão, maior a pressão nos pontos medidos. Também observa-se uma queda da pressão após a redução do diâmetro da tubulação, além do pequeno decréscimo da mesma nos acidentes no trecho horizontal. No trecho inclinado, nota-se um aumento da pressão absoluta devido a própria inclinação.

Na Figura 6.3 é possível verificar com mais detalhes a variação da pressão nas proximidades da junção T. Antes da junção T, observou-se um comportamento oscilatório da queda de pressão. Inicialmente, há um aumento da queda de pressão

até atingir-se um platô. Nas proximidades logo antes do início da ramificação, houve um decréscimo da queda de pressão e, em seguida, a mesma aumentou de forma monotônica. Conforme a vazão aumenta, a perda de carga aumenta de forma similar em todos os pontos medidos.

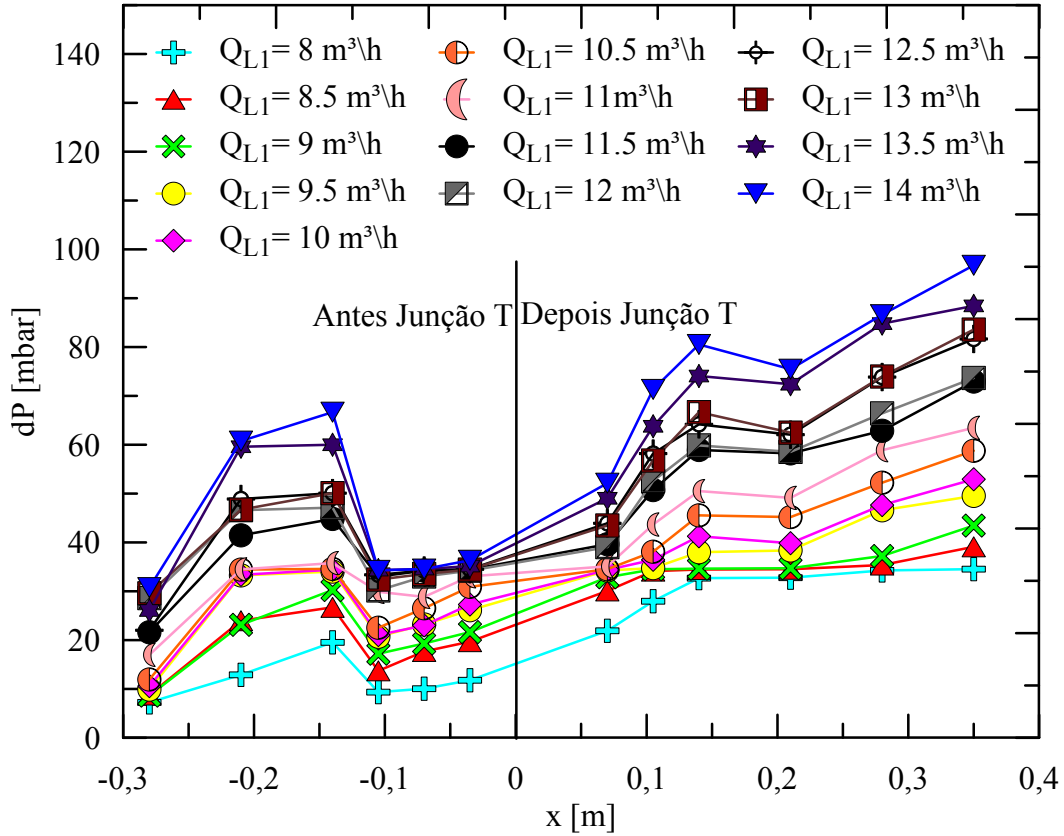


Figura 6.3: Perda de carga nas proximidades da junção T

6.1.3 Medições com PIV

Inicialmente, fez-se um estudo do tempo ideal entre pulsos do laser e o tipo de processamento desses dados a serem utilizados nos ensaios, visando obter a melhor representação da velocidade real do escoamento. Foram realizados um estudo com diferentes tempos entre pulsos: 300; 500; 600; 800; 833; 900; 1000 e 1200 μs . Após a aquisição das imagens, utilizou-se um perfil de referência (perfil 4) que foi processado de três maneiras distintas, onde, basicamente, foi modificados os tamanhos das janelas de processamento (máxima, mínima e redondezas). Para cada processamento, obteve-se um perfil de velocidade distinto que ao ser integrado obteve-se a vazão de líquido, esta foi comparada com a vazão real corrigida, e assim, eleito o melhor processamento, juntamente, com o melhor tempo entre pulsos. É importante

ressaltar que utilizando a técnica de PIV, não se consegue medir velocidades muito próximas a parede da tubulação, sendo assim, foi adotada uma aproximação destas velocidades utilizando uma Lei de Potência, cujo expoente foi calculado para cada perfil utilizado através de um método iterativo.

Após esta análise conclui-se que a combinação do tempo entre pulsos de $500 \mu s$ com o processamento utilizando janelas, área a serem processadas, de 8×8 pixels (mínima), 22×22 pixels (máxima) e 6×6 pixels (redondezas), gerou a melhor aproximação da vazão real com a vazão teórica analisada, com a menor discrepância dos resultados (5%), representados na Figura 6.4.

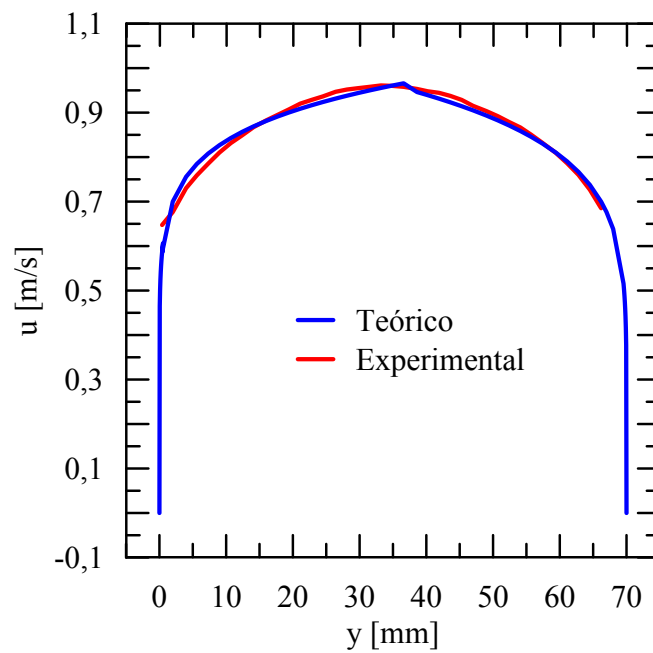


Figura 6.4: Comparação dos perfis do modelo teórico com o experimental

Na Figura 6.5 é apresentado o campo de velocidade médio na junção T para uma vazão de líquido de, aproximadamente, $11 \text{ m}^3/h$, onde a velocidade na seção inclinada da junção é maior que na perna vertical. Também foram geradas linhas de corrente do escoamento, representado na Figura 6.6, onde nota-se na perna vertical regiões de recirculação, uma vez que, a altura de coluna de líquido na perna se mantém constante para uma mesma vazão.

Nos ensaios de visualização para o estudo monofásico foi possível observar perfis de velocidade na seção transversal da tubulação inclinada (y), apresentados na Figura 6.7, onde as distâncias dos perfis para o centro da junção T (meio da tubulação da perna vertical, mesmo referencial adotado nas tomadas de pressão) são dados na Tabela 6.1.

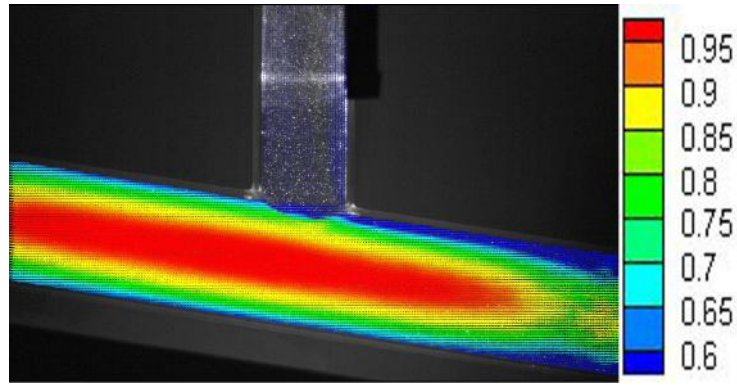


Figura 6.5: Campo de velocidade na junção T para $Q_{L1}=11m^3/h$.

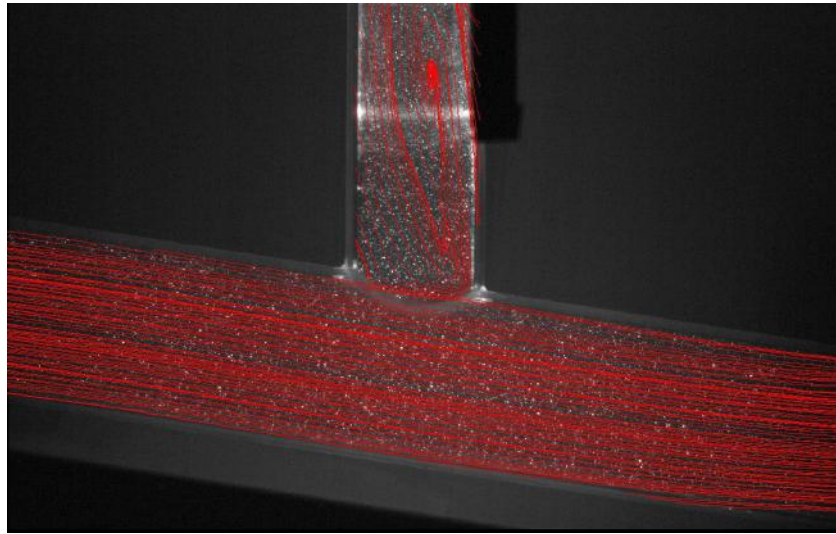
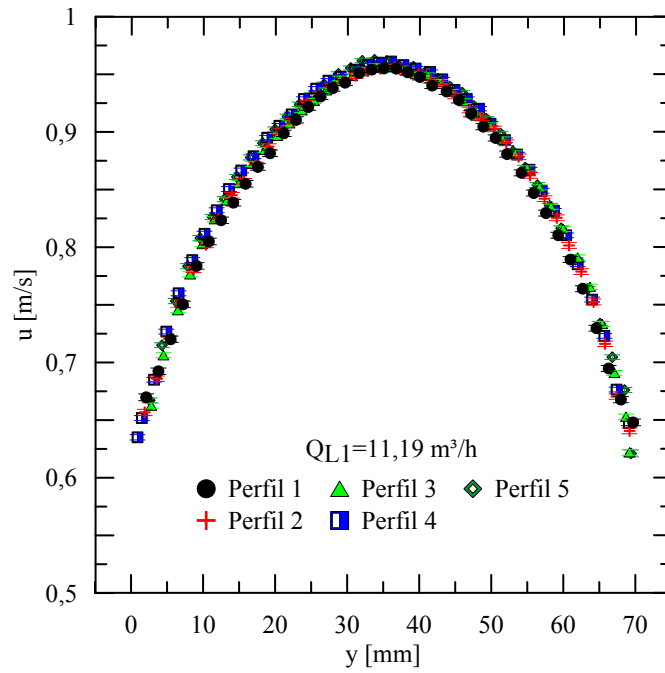


Figura 6.6: Linhas de tendência na junção T para $Q_{L1}=11m^3/h$.

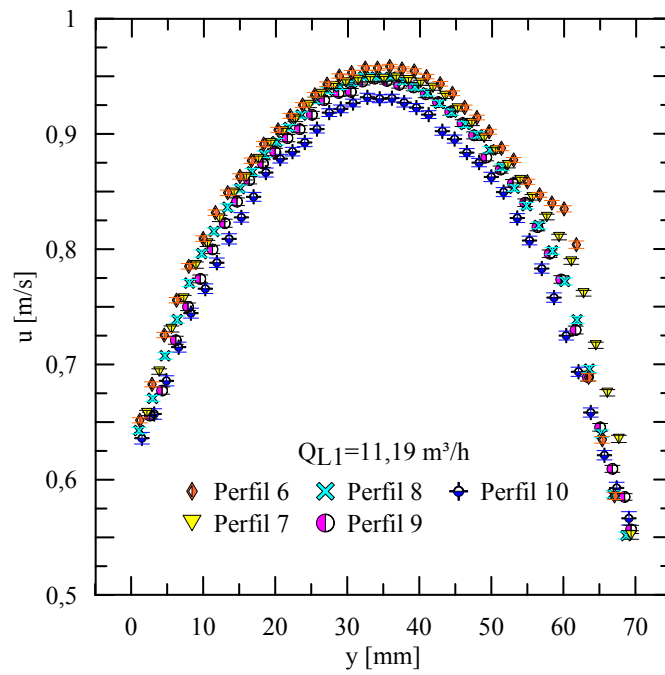
Tabela 6.1: Distâncias dos perfis de velocidade na Junção T

Perfil	x [mm]
1	-149,72
2	-120,17
3	-92,06
4	-55,23
5	-25,23
6	0
7	25,46
8	53,29
9	82,07
10	110,07

Observa-se na Figura 6.7 que os perfis de velocidade são similares para as diferentes posições na junção T. O referencial adotado em relação a distância y (Figura 4.19) da tubulação começa do lado oposto da perna vertical, assim, nota-se que ao se aproximar da perna vertical (distâncias acima de 40 mm), há uma ligeira mudança



(a) Perfis a montante do início da junção.



(b) Perfis a jusante do início da junção.

Figura 6.7: Perfis de velocidade ao longo do trecho inclinado na Junção T.

nos perfis, possivelmente decorrente da recirculação de líquido na perna vertical. Para melhor analisar este fenômeno, subtraiu-se os perfis de velocidade do perfil 1 (p1), o resultado destas operações são ilustrados na Figura 6.8.

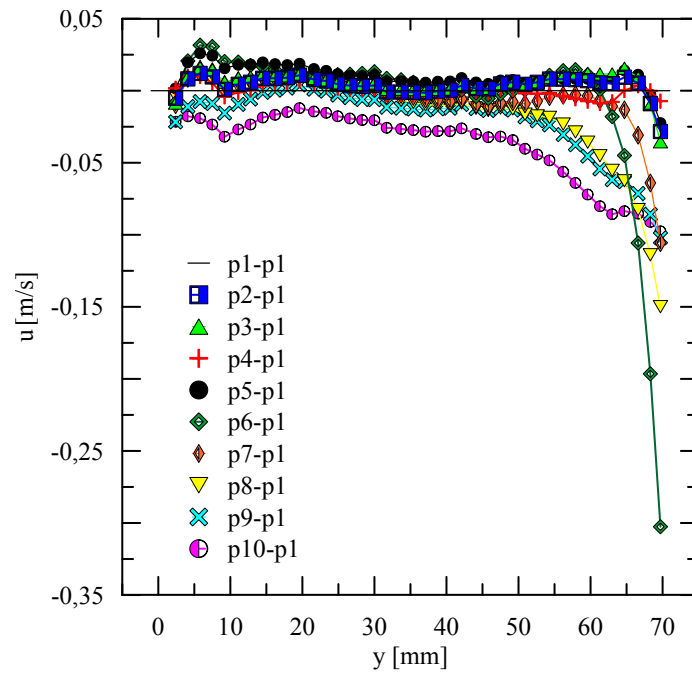


Figura 6.8: Diferença dos Perfis de Velocidade para Escoamento Monofásico na Junção T

Na Figura 6.8 observa-se uma oscilação da diferença de velocidade, tendo uma velocidade predominantemente positiva na região da tubulação mais distante da perna vertical, e predominantemente negativa na região mais próxima a ramificação.

Além dos perfis do trecho inclinado, observou-se o comportamento do escoamento no trecho da perna vertical. Para esta análise, como o escoamento nesta parte da junção possui uma velocidade inferior a do trecho inclinado, utilizou-se um tempo entre pulsos maior, $1000 \mu s$, resultando em um campo de velocidade apresentado na Figura 6.9.

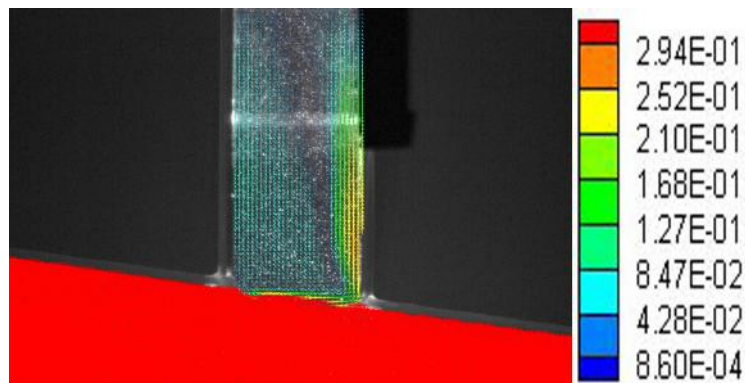


Figura 6.9: Campo de velocidade na perna vertical da junção T

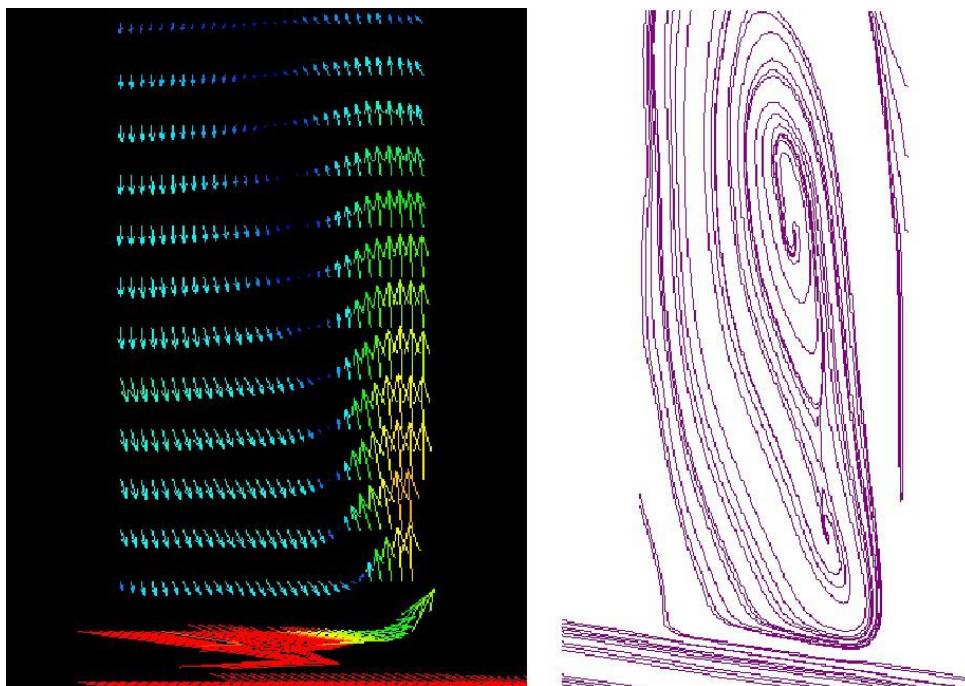


Figura 6.10: Campo de velocidade e linhas de corrente na perna vertical da junção T

Foi possível observar que no início da perna vertical há uma grande região de recirculação, onde a divisão do escoamento se dá mais fortemente pelo lado oposto da entrada da junção (lado direito, considerando que o escoamento é da esquerda para direita). Esse fenômeno é caracterizado pelas linhas de corrente do escoamento apresentadas mais detalhadamente na (Figura 6.10).

6.2 Bifásico

6.2.1 Condições Experimentais

Para este trabalho, os ensaios de balanço mássico e de pressão utilizaram vazões de gás mais altas comparadas as utilizadas nos ensaios de visualização. Abaixo são apresentados os casos utilizados, sendo a Tabela 6.2 os casos dos ensaios de balanço mássicos que não geraram saída de líquido pelo trecho 3, as Tabelas 6.3 e 6.4 apresentam os casos dos ensaios de balanço mássicos que geraram saída de líquido pelo trecho 3, onde, basicamente, variou-se as vazões de gás de 1,7 a 7,5 m^3/h e de líquido de 8,0 a 14 m^3/h durante 5 minutos para cada ensaio, tendo o padrão de escoamento na entrada e saída inclinada da junção sempre estratificado, e na perna vertical pistonado e agitado.

Q_{G1} [m^3/h]	P_{ar} [bar]	T_{ar} [$^{\circ}C$]	P_{Tub} [bar]	T_{Tub} [$^{\circ}C$]	Q_{G1} [m^3/h]	Tempo [min]	$\frac{Q_{G3}}{Q_{G1}}$	$\frac{Q_{L3}}{Q_{L1}}$
1,9	1,67	22,8	1,11	24,4	8,1	5	6,8E-01	0,0E+00
1,9	1,66	22,8	1,09	24,4	8,1	5	6,8E-01	0,0E+00
1,9	1,68	21,5	1,12	24,3	9,1	5	6,1E-01	0,0E+00
1,9	1,67	22,6	1,12	24,9	8,7	5	6,2E-01	0,0E+00
1,8	1,65	20,6	1,14	25,1	10,3	5	5,5E-01	0,0E+00
1,8	1,65	21,6	1,14	25,1	10,1	5	5,5E-01	0,0E+00
1,8	1,64	21,0	1,16	25,4	11,2	5	5,4E-01	0,0E+00
1,8	1,64	22,5	1,16	25,5	11,3	5	5,5E-01	0,0E+00
2,4	1,78	22,2	1,11	27,2	8,1	5	7,1E-01	0,0E+00
2,4	1,78	24,6	1,11	27,2	8,1	5	7,2E-01	0,0E+00
2,4	1,78	24,7	1,11	27,3	8,1	5	7,2E-01	0,0E+00
2,6	1,90	23,5	1,12	27,3	9,0	5	7,0E-01	0,0E+00
2,6	1,88	22,7	1,14	26,3	10,2	5	6,9E-01	0,0E+00
2,6	1,87	22,9	1,14	26,4	9,9	5	6,8E-01	0,0E+00
2,6	1,87	23,0	1,14	26,4	10,2	5	6,8E-01	0,0E+00
3,2	2,07	23,3	1,11	27,5	8,2	5	7,8E-01	0,0E+00
3,8	1,69	23,8	1,11	27,5	8,1	5	8,1E-01	0,0E+00
3,7	1,66	23,7	1,09	27,5	8,1	5	8,0E-01	0,0E+00
3,7	1,66	23,8	1,09	27,5	8,2	5	8,5E-01	0,0E+00
3,3	1,74	22,7	1,11	28,1	9,0	5	7,5E-01	0,0E+00
3,3	1,74	23,5	1,12	28,2	9,0	5	7,7E-01	0,0E+00
3,3	1,67	24,4	1,09	29,0	8,1	5	8,1E-01	0,0E+00
4,5	1,77	25,0	1,10	29,1	8,1	5	8,6E-01	0,0E+00
4,4	1,77	25,0	1,11	29,1	8,1	5	8,6E-01	0,0E+00
4,4	1,77	25,3	1,11	29,2	9,0	5	8,2E-01	0,0E+00
4,5	1,78	25,4	1,11	29,2	9,0	5	8,4E-01	0,0E+00

Tabela 6.2: Parâmetros adotados nos Ensaios de Balanço Mássico sem saída de Líquido pelo trecho 3.

Q_{G1} [m ³ /h]	P_{ar} [bar]	T_{ar} [°C]	P_{Tub} [bar]	T_{Tub} [°C]	Q_{G1} [m ³ /h]	$\frac{Q_{G3}}{Q_{G1}}$	$\frac{Q_{L3}}{Q_{L1}}$	u_{Gs1} [m/s]	u_{Ls1} [m/s]	u_m [m/s]
1,8	1,65	22,2	1,19	26,4	12,4	5,4E-01	1,1E-02	0,13	0,90	1,02
1,7	1,65	23,8	1,19	26,5	12,4	5,4E-01	1,1E-02	0,13	0,90	1,02
2,6	1,90	22,7	1,16	26,7	11,2	6,4E-01	1,3E-02	0,19	0,81	1,00
2,6	1,88	22,7	1,16	26,9	11,2	6,5E-01	7,7E-03	0,19	0,81	0,99
1,7	1,63	22,7	1,20	27,7	14,1	5,6E-01	4,8E-02	0,12	1,02	1,14
1,7	1,63	22,7	1,19	27,9	13,9	5,6E-01	4,9E-02	0,13	1,01	1,13
2,5	1,68	22,2	1,17	24,8	12,3	6,7E-01	4,6E-02	0,18	0,89	1,07
2,5	1,68	22,9	1,17	28,1	12,1	6,7E-01	4,6E-02	0,18	0,87	1,06
3,4	1,80	23,6	1,14	28,3	9,9	7,6E-01	1,4E-03	0,25	0,72	0,96
3,4	1,80	23,8	1,14	28,3	10,0	7,5E-01	1,3E-02	0,25	0,72	0,97
3,3	1,79	22,7	1,15	28,4	11,2	7,6E-01	2,8E-02	0,24	0,80	1,05
3,3	1,79	23,8	1,15	28,5	11,1	7,2E-01	2,8E-02	0,24	0,80	1,04
3,3	1,76	23,2	1,16	28,6	12,4	7,7E-01	6,4E-02	0,24	0,89	1,13
3,4	1,81	23,6	1,16	28,6	12,5	7,4E-01	7,0E-02	0,25	0,90	1,15
3,4	1,81	24,1	1,16	28,7	12,3	7,3E-01	7,1E-02	0,25	0,89	1,13
2,5	1,71	22,4	1,18	28,7	13,7	7,3E-01	7,9E-02	0,18	0,99	1,17
2,6	1,74	23,6	1,18	28,8	13,6	7,5E-01	8,1E-02	0,19	0,99	1,17
3,5	1,83	23,5	1,17	28,9	13,6	7,9E-01	1,0E-01	0,25	0,98	1,23
3,4	1,83	24,4	1,17	29,0	13,7	8,0E-01	1,0E-01	0,25	0,99	1,24
4,4	1,77	25,4	1,12	29,2	9,0	8,4E-01	6,1E-03	0,32	0,65	0,97
4,4	1,78	24,7	1,13	29,3	10,1	8,3E-01	1,1E-02	0,32	0,73	1,05
4,4	1,78	25,4	1,13	29,3	9,9	8,3E-01	1,2E-02	0,32	0,71	1,03
4,4	1,80	25,6	1,14	29,4	11,1	8,1E-01	5,0E-02	0,32	0,80	1,12
4,4	1,80	25,1	1,15	29,5	12,3	8,4E-01	8,6E-02	0,32	0,89	1,21
4,4	1,80	25,7	1,15	29,6	12,4	8,3E-01	8,5E-02	0,32	0,89	1,21
4,0	1,84	25,2	1,15	29,7	13,7	9,4E-01	1,3E-01	0,29	0,99	1,28
4,0	1,84	25,8	1,16	29,7	13,7	9,2E-01	1,3E-01	0,29	0,99	1,28

Tabela 6.3: Parâmetros adotados nos Ensaios de Balanço Mássico com saída de Líquido pelo trecho 3 - Parte 1.

6.2.2 Medições de Pressão

Para diferentes vazões de líquido e gás (Q_{L1}/Q_{G1}) na entrada do aparato, foi avaliada a variação do diferencial de pressão ao longo da junção. Os casos utilizados nestes ensaios são apresentados na Tabela 6.5, onde se tem ensaios que não há saída de líquido pela perna ($Q_{L3}/Q_{L1} = 0$) e outros sim ($Q_{L3}/Q_{L1} \neq 0$).

A Figura 6.11 apresenta o comportamento do diferencial de pressão, onde, no início da junção se tem um diferencial positivo que decresce conforme há a aproximação da junção. Após a junção, o diferencial de pressão se torna negativo, e continua a decrescer, com um comportamento amortecido, conforme há o afastamento da junção. Independente da razão de vazão líquido e gás da entrada, o comportamento

Q_{G1} [m ³ /h]	P_{ar} [bar]	T_{ar} [°C]	P_{Tub} [bar]	T_{Tub} [°C]	Q_{G1} [m ³ /h]	$\frac{Q_{G3}}{Q_{G1}}$	$\frac{Q_{L3}}{Q_{L1}}$	u_{Gs1} [m/s]	u_{Ls1} [m/s]	u_m [m/s]
4,9	1,89	23,3	1,11	27,6	9,0	9,1E-01	3,5E-03	0,35	0,65	1,00
4,8	1,89	23,3	1,12	27,6	9,0	9,3E-01	2,3E-02	0,35	0,65	1,00
4,7	1,87	23,5	1,13	27,8	10,1	9,3E-01	4,8E-02	0,34	0,73	1,07
4,8	1,90	23,6	1,13	27,9	10,1	9,1E-01	4,0E-02	0,35	0,73	1,07
4,7	1,91	23,6	1,14	28,1	11,2	9,3E-01	7,4E-02	0,34	0,81	1,15
4,7	1,91	23,7	1,14	28,1	11,2	9,2E-01	7,5E-02	0,34	0,81	1,15
4,8	1,95	23,9	1,15	28,3	12,3	9,3E-01	1,2E-01	0,35	0,89	1,24
4,8	1,95	24,0	1,15	28,4	12,4	9,1E-01	1,1E-01	0,35	0,89	1,24
4,7	1,94	24,0	1,16	28,8	13,7	9,1E-01	1,4E-01	0,34	0,99	1,33
4,7	1,94	24,2	1,16	28,8	13,5	9,4E-01	1,4E-01	0,34	0,97	1,31
6,0	1,87	24,3	1,15	29,0	13,6	9,2E-01	1,5E-01	0,43	0,98	1,41
6,0	1,87	24,3	1,15	29,0	13,6	9,4E-01	1,5E-01	0,43	0,99	1,42
7,6	2,04	24,4	1,15	29,1	13,7	9,4E-01	1,6E-01	0,55	0,99	1,54
7,6	2,04	24,4	1,15	29,2	13,6	9,2E-01	1,6E-01	0,55	0,99	1,54
7,4	1,98	24,7	1,14	29,5	12,4	9,1E-01	1,3E-01	0,53	0,89	1,43
7,4	1,97	24,8	1,14	29,5	12,3	9,3E-01	1,3E-01	0,53	0,89	1,43

Tabela 6.4: Parâmetros adotados nos Ensaios de Balanço Mássico com saída de Líquido pelo trecho 3 - Parte 2.

Q_{G1} [m ³ /h]	Q_{G1} [m ³ /h]	$\frac{Q_{L1}}{Q_{G1}}$	u_{Gs} [m/s]	u_{Ls} [m/s]	u_m [m/s]	$\frac{Q_{G3}}{Q_{G1}}$	$\frac{Q_{L3}}{Q_{L1}}$
8,0	4,0	2,0	0,3	0,6	0,9	8,1E-0,1	0,0E+00
8,0	2,8	2,9	0,1	0,6	0,7	7,20E-01	0,0E+00
8,0	1,8	4,5	0,2	0,6	0,8	6,80E-01	0,0E+00
11,2	1,8	6,1	0,1	0,8	0,9	5,40E-01	0,0E+00
11,2	2,7	4,2	0,3	0,8	1,1	6,50E-01	7,70E-03
11,2	3,9	2,9	0,3	0,8	1,1	7,60E-01	2,80E-02
12,4	2,8	4,4	0,2	0,9	1,1	6,70E-01	4,60E-02
13,7	1,8	7,5	0,1	1,0	1,1	5,60E-01	4,80E-02
13,7	2,9	4,7	0,2	1,0	1,2	7,30E-01	7,90E-02
13,7	4,7	2,9	0,3	1,0	1,3	9,40E-01	1,40E-01

Tabela 6.5: Casos utilizados para ensaios de pressão com escoamento bifásico.

do diferencial de pressão observado na Figura 6.11 é similar.

A queda de pressão após a junção pode ser explicada pela diminuição da velocidade deste trecho, uma vez que a junção faz com que haja a divisão do escoamento, diminuindo assim a velocidade do escoamento inicial (trecho 1) e consequentemente aumentando a pressão, diferentemente do que foi observado no estudo monofásico, onde o escoamento no trecho da perna vertical era praticamente nulo (somente recirculação), não havendo uma divisão do escoamento tão marcante.

Para melhor analisar os dados da Figura 6.11, separou-se os resultado dos casos de vazões que apresentaram saída de líquido pela perna vertical com os que não

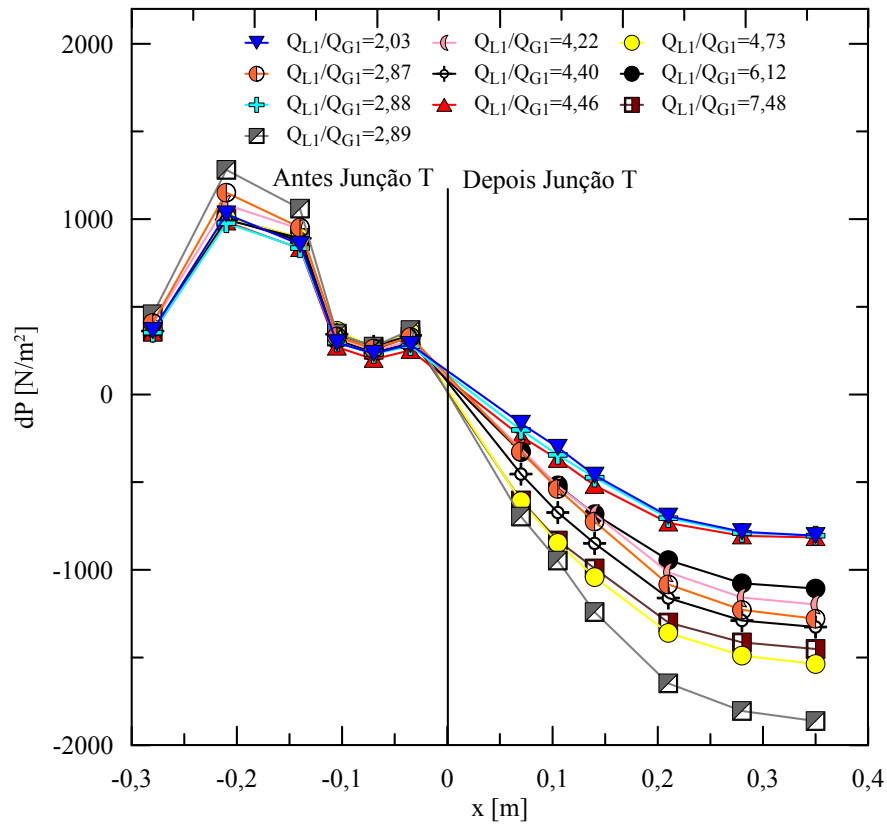


Figura 6.11: Diferencial de pressão ao longo da junção

apresentaram, ilustrados nas Figuras 6.12a e 6.12b, respectivamente.

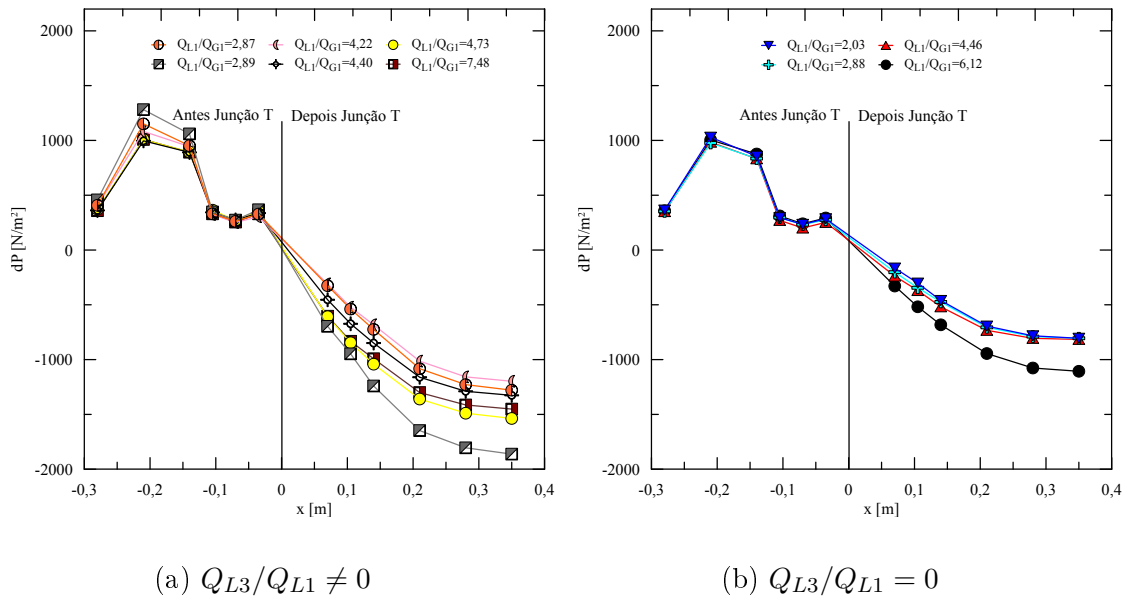
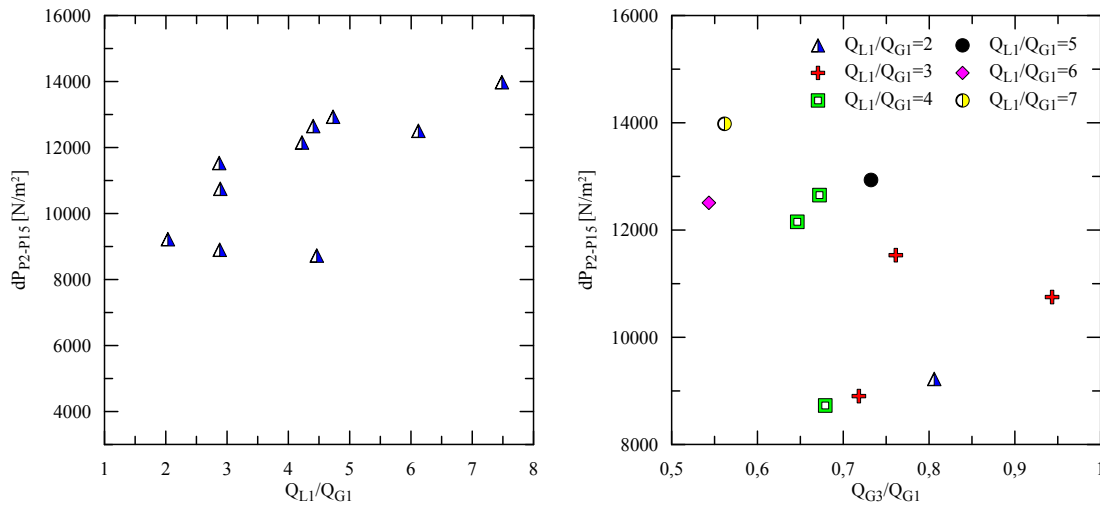


Figura 6.12: Diferencial de pressão ao longo da junção.

Pode-se observar na Figura 6.12a que o trecho após a junção T possui um dife-

rencial de pressão mais negativo quando comparado com a Figura 6.12b, este fato se deve pois como na Figura 6.12a há saída de líquido na perna vertical a pressão se torna menor no trecho 2. As incertezas do diferencial são inferiores a 3%, e não é possível observá-las nas Figuras 6.11, 6.12 e 6.13.

Analisando o diferencial de pressão entre dois pontos, sendo um antes da junção (P_2) e outro após a junção (último ponto de pressão do aparato - P_{15}), para diferentes casos de vazão gás/líquido, pode-se observar que conforme há um aumento na razão de entrada (Q_{L1}/Q_{G1}), também há um aumento do diferencial de pressão (Figura 6.13a). Observa-se ainda um grande espalhamento dos dados quando avalia-se os mesmos para uma razão de entrada similar (Q_{L1}/Q_{G1}) com foco na fração de gás separado na junção (Figura 6.13b). Sendo assim, aparentemente, estes gráficos são pouco conclusivos, pois muitos fatores influenciam o escoamento até o ponto de pressão P_{15} , fazendo com que estes apresentem comportamento altamente não linear.



(a) Razões de entrada diferentes.

(b) Razões de separação de gás distintas.

Figura 6.13: Diferencial de pressão antes e depois da junção avaliando a separação das fases.

Na tentativa de diminuir as influências dos efeitos não lineares, tomou-se outros pontos de pressão como referencial de baixa pressão, P_{23} , localizado no trecho inclinado logo após a ramificação da junção T, e de alta pressão, P_{16} , primeiro ponto antes da junção. Esta escolha avalia os efeitos da junção somente, diferentemente da análise anterior que possui as interferências de toda a perda de carga da tubulação do aparato. Na Figura 6.14 são analisados os diferenciais de pressão para os casos de vazões que não proporcionam separação de líquido pela perna vertical, $Q_{L3}/Q_{L1} = 0$. Observa-se um comportamento linear, conforme há um aumento da separação da fase gasosa, há um aumento do diferencial de pressão.

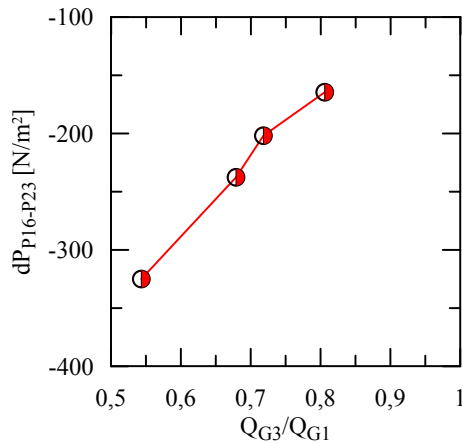


Figura 6.14: Diferencial de pressão antes e depois da junção para razões de separação de gás distintas.

6.2.3 Medições do Balanço Mássico

Para cada condição experimental listada na Tabela 4.1, foram realizadas medições de vazão das fases líquida e gasosa nas saídas da junção do tipo T, trecho 2 e 3. Nestas condições de entrada, o padrão de escoamento observado foi caracterizado como estratificado, favorecendo assim, a separação da fase gasosa na junção, como observado por REIMANN *et al.* (1988). As incertezas das medições foram calculadas, tendo Q_{G3}/Q_{G1} incerteza máxima de 10%, Q_{L3}/Q_{L1} incerteza máxima de 6% e Q_{L1}/Q_{G1} incerteza máxima de 7%. No apêndice C são apresentadas detalhadamente todas incertezas calculadas.

Inicialmente, foram avaliadas as condições experimentais onde não há saída de líquido pela perna vertical (trecho 3). O gráfico apresentado na Figura 6.15 compara as vazões da entrada (Q_{L1} e Q_{G1}) com as razões das vazões na saída no trecho 3 (Q_{L3} e Q_{G3}).

Neste gráfico, a linha contínua representa uma separação completa das fases, quando todo o gás na entrada é separado no ramal vertical ($Q_{G3}/Q_{G1} = 1$). É possível observar que com o aumento da vazão de líquido, a fração de gás separado pela junção diminui. Este fato ocorre pois a fase gasosa fica menos tempo exposta à junção conforme há o aumento da vazão de líquido, assim, uma maior quantidade de gás é carregado pelo trecho 2 (não separado).

Outra maneira de se observar os mesmos dados é analisando somente as vazões de gás de entrada e saída vertical da junção T. A separação, conforme há uma mudança na vazão de líquido de entrada, apresenta uma tendência linear (Figura 6.16).

Para o restante das condições experimentais utilizadas, juntamente com a fase

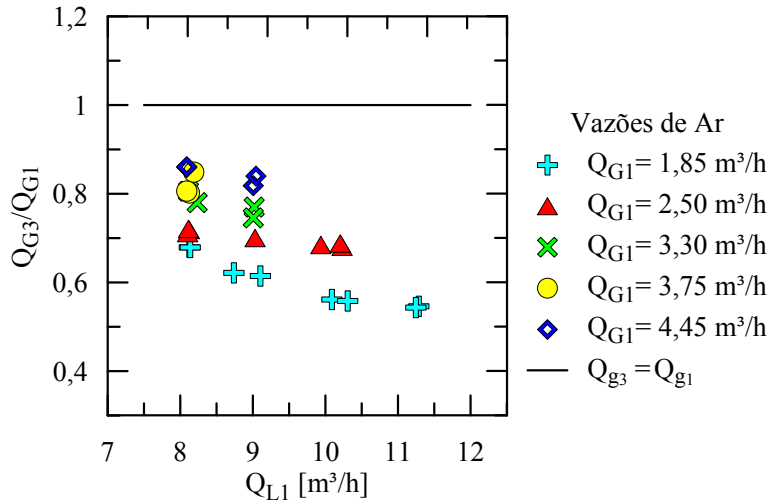


Figura 6.15: Comparação entre as vazões de gás variando a vazão de líquido na entrada.

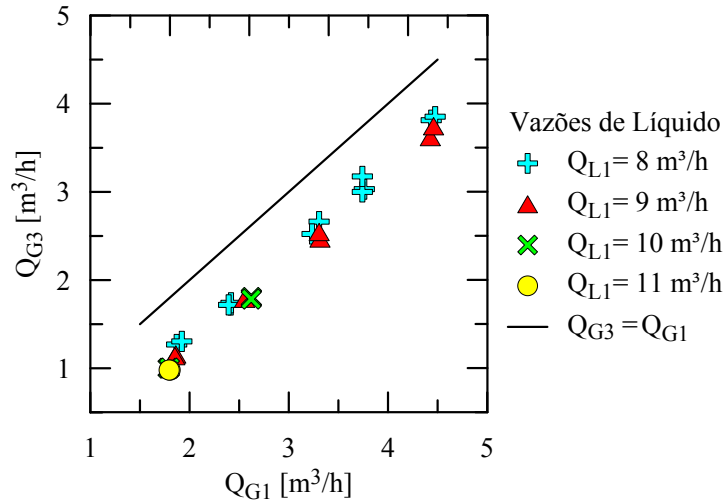


Figura 6.16: Comparação entre as vazões de gás na entrada e na saída vertical da junção do tipo T.

gasosa, há saída de líquido pela perna da junção (Figura 6.17 e 6.18).

Pode-se observar que com o aumento da fração de líquido as tendências observadas na Figura 6.18 não devem ser surpreendentes. Se a descrição simples do escoamento é usada, o filme é facilmente desviado no braço lateral, enquanto as bolhas, devido ao seu maior impulso, seguem diretamente após a junção. Diminuir as taxas de entrada de gás e líquido no escoamento, diminuem a fração de líquido arrastado, aumenta a fração de líquido no filme e, portanto, a fração de líquido

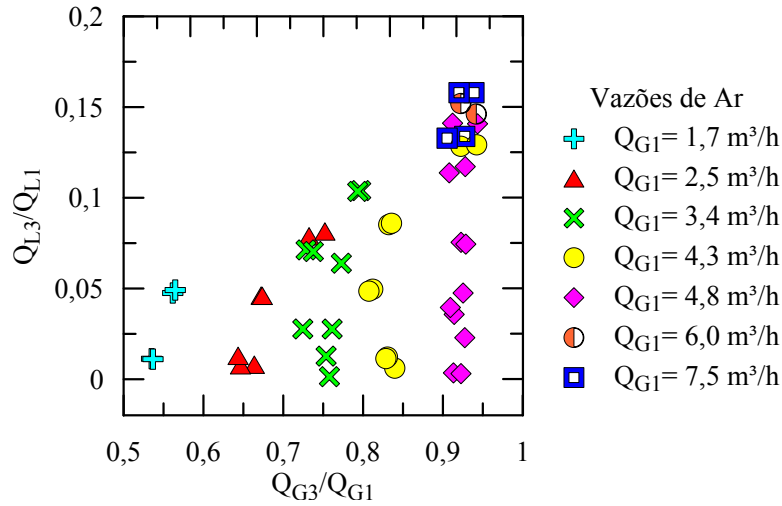


Figura 6.17: Comparação entre as vazões de gás na entrada e na saída vertical da junção do tipo T fixando as vazões de gás.

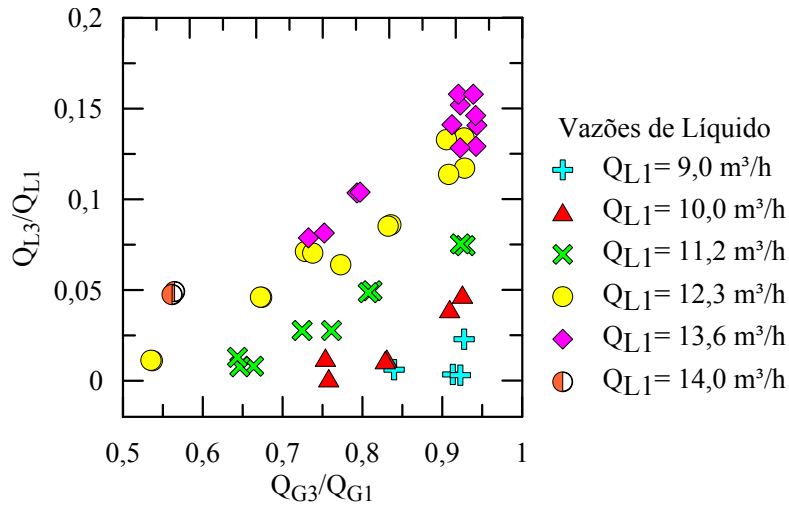


Figura 6.18: Comparação entre as vazões de gás na entrada e na saída vertical da junção do tipo T fixando as vazões de líquido.

retirado (AZZOPARDI, 1988).

Analisando os mesmos dados das Figuras 6.17 e 6.18, porém agora fazendo a razão da vazão de líquido pela a vazão de gás de entrada (Figura 6.19), observa-se que quanto menor esta razão maior quantidade de gás é separada pela junção ($Q_3/Q_1 = 1$).

Foi observado durante as medições que, quando havia presença de uma coluna de líquido na perna vertical da junção T, a densidade indicada no medidor de vazão na

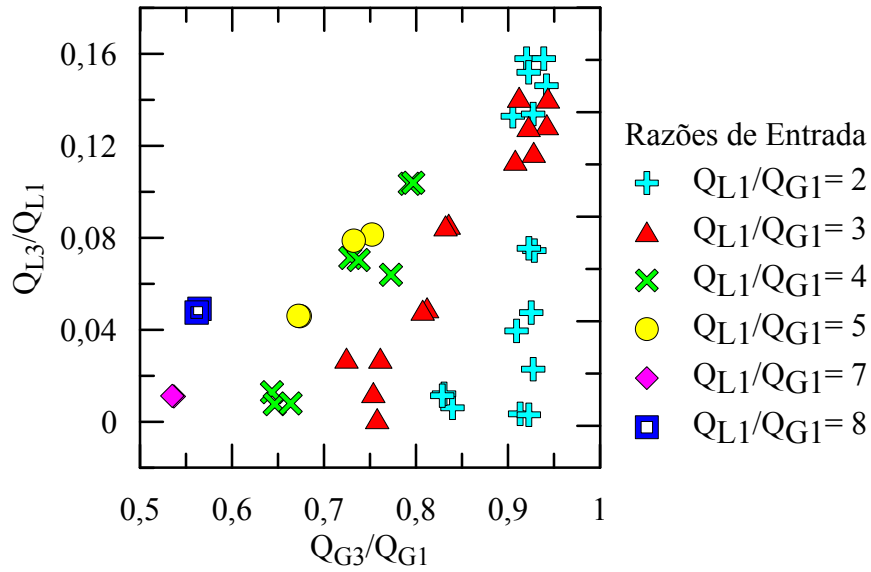


Figura 6.19: Comparação entre as vazões de gás na entrada e na saída vertical da junção do tipo T para uma mesma razão fluidos de entrada.

saída do trecho 2 (Coriolis) era menor (em relação a fase líquida) devido à presença de gás no tubo horizontal inferior. Também pode-se observar que ao aumentar a vazão de líquido na entrada da junção T, para uma mesma vazão de gás, a densidade média do trecho 2 diminuiu (Figura 6.20).

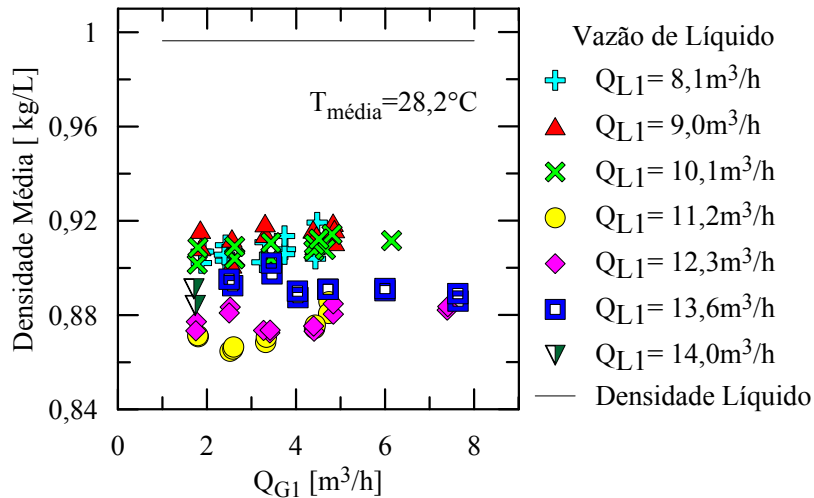


Figura 6.20: Variação da densidade média.

O aumento da vazão de líquido na entrada da junção implica em aumento da velocidade superficial desta fase. Deste modo, o tempo de residência das bolhas

dispersas sob a área da seção transversal do trecho 3 diminui. Assim, devido à menor exposição da fase gasosa ao ramo vertical (trecho 3), o processo de separação torna-se menos eficiente, também observado para outros casos de vazões em GAVIOLI *et al.* (2016).

6.2.4 Medições com Shadow Sizer

Estes resultados tem por objetivo caracterizar a fase não separada pela junção do tipo T estudada utilizando os casos de vazões listados anteriormente na Tabela 4.1. Com esta análise, foi possível determinar o diâmetro equivalente e velocidades das bolhas não separadas pela junção.

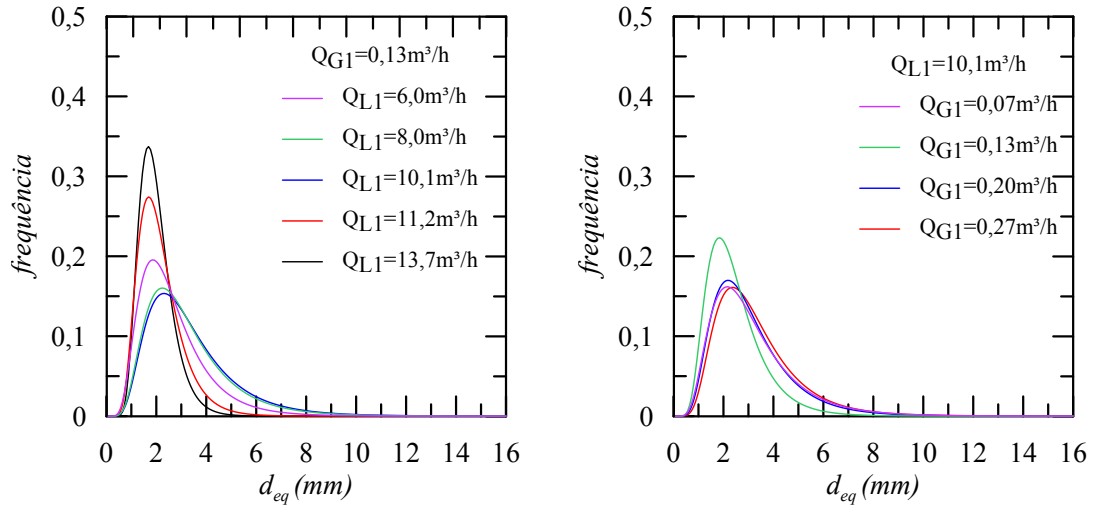
Nestas vazões foram observados alguns fenômenos:

- Caso 1: a segunda bolha aumenta de tamanho e une-se a primeira bolha, neste momento, o pistão de líquido atinge a junção.
- Caso 3/7: a primeira e segunda bolha aumentam de tamanho e a terceira é separada na junção.
- Casos 5 e 6: não há formação de bolhas estáticas antes da junção T, somente pequenas bolhas são formadas e carregadas pela tubulação.
- Caso 9: uma terceira bolha, alimentada pela esteira da segunda bolha, tenta se formar antes da junção T.

As Figuras 6.21a e 6.21b representam a frequência da distribuição do diâmetro equivalente das bolhas não separadas.

Tanto para os casos de vazão de gás fixo, quanto para os casos de vazão com líquido fixo, o diâmetro médio das bolhas não separadas é similar, apresentando maiores quantidades de bolhas com diâmetro, aproximadamente, de $2mm$. Quando a vazão de gás é fixa (Figura 6.21a), pode-se observar que para os casos de 6,0, 8,0 e 10,1 m^3/h , há uma maior dispersão dos valores do tamanho das bolhas não separadas, esse fato pode-ser explicado, uma vez que nestes casos existe a presença da esteira de uma bolha fixa na entrada da junção, como ilustrado na Figura 4.25. Agora, ao analisar os casos de 11,2 e 13,7 m^3/h (Figura 6.21a), observa-se uma frequência maior de bolhas de diâmetros menores, isto também é decorrente da condição de entrada do escoamento, nestas vazões não há a formação de bolhas fixas antes da junção, e assim, a quantidade de bolhas menores que não são separadas aumenta.

Avaliando os diâmetros para uma vazão fixa de líquido na entrada da junção T (Figura 6.21b), nota-se que há uma similaridade na distribuição dos diâmetros das bolhas não separadas, assim, pode-se concluir que a vazão de líquido influência



(a) Vazão de gás fixa

(b) Vazão de líquido fixa

Figura 6.21: Diâmetros equivalentes da análise de *Shadow Sizing*.

diretamente na separação, quanto mais rápido o escoamento (maior vazão de líquido na entrada), menos tempo a fase gasosa estará exposta à junção T, assim, diminuindo a eficiência da separação.

Outro resultado obtido através da técnica de *Shadow Sizing* é a velocidade das bolhas não separadas, como o escoamento deste trabalho é inclinado, a velocidade das bolhas possui duas coordenadas, uma em x (U_b) e outra em y (V_b), onde o referencial para o eixo x é dado da esquerda para direita e para o eixo y de baixo para cima (Figura 6.22). As Figuras 6.23a, 6.23b, 6.24a e 6.24b apresentam estes resultados.

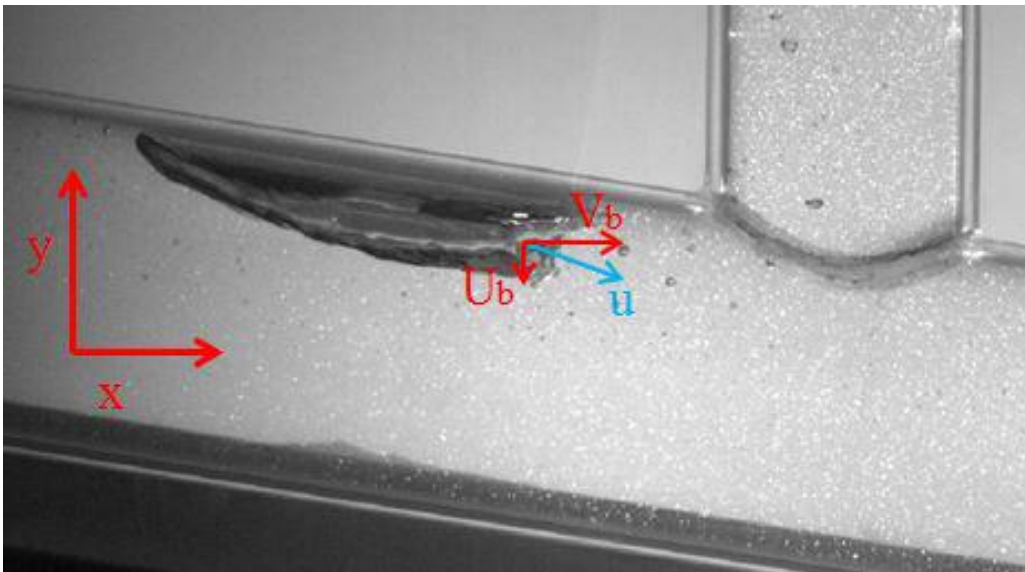
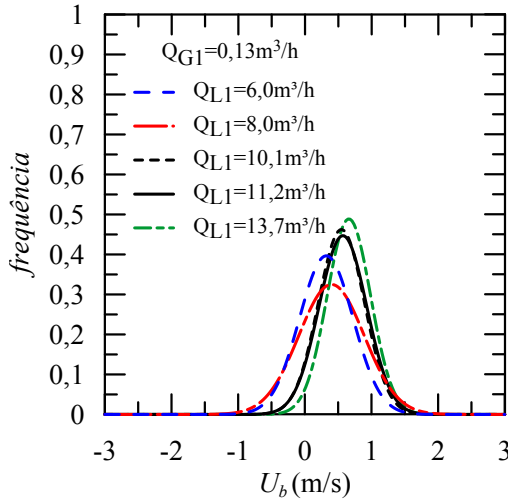
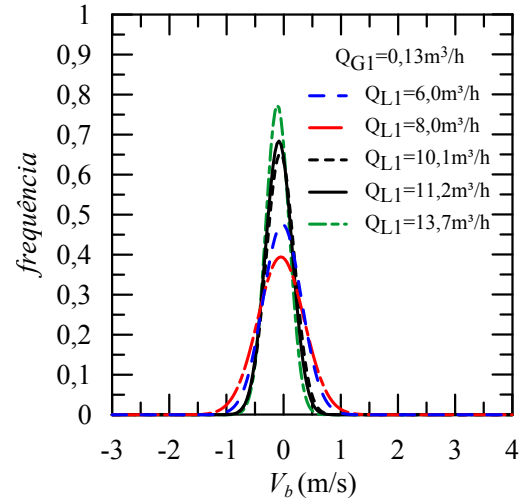


Figura 6.22: Referencial adotado para os ensaios bifásicos de *Shadow Sizing*.

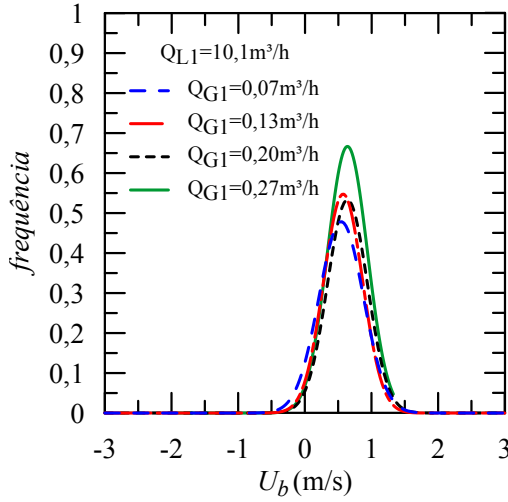


(a) velocidade no eixo x

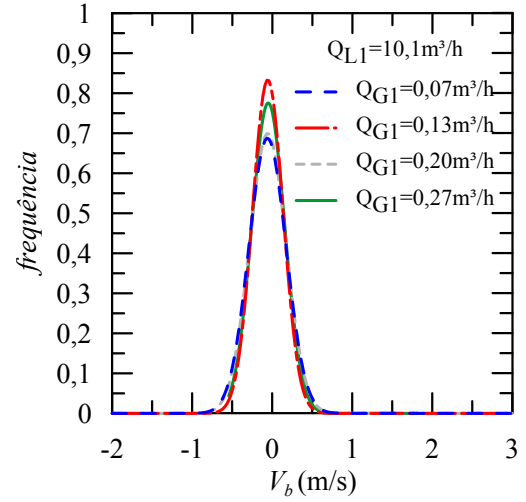


(b) velocidade no eixo y

Figura 6.23: Velocidades das bolhas não separadas para uma mesma vazão de gás.



(a) velocidade no eixo x



(b) velocidade no eixo y

Figura 6.24: Velocidades das bolhas não separadas para uma mesma vazão de líquido.

Para todos os casos testados, a velocidade V_b no eixo y é predominantemente negativa, assim como a velocidade U_b no eixo x é predominantemente positiva, isso se deve pelo fato do escoamento ocorrer em uma tubulação inclinada para baixo. As velocidades positivas em y e negativas em x, se devem ao efeito da recirculação das bolhas após a junção, observado no exemplo da Figura 6.25.

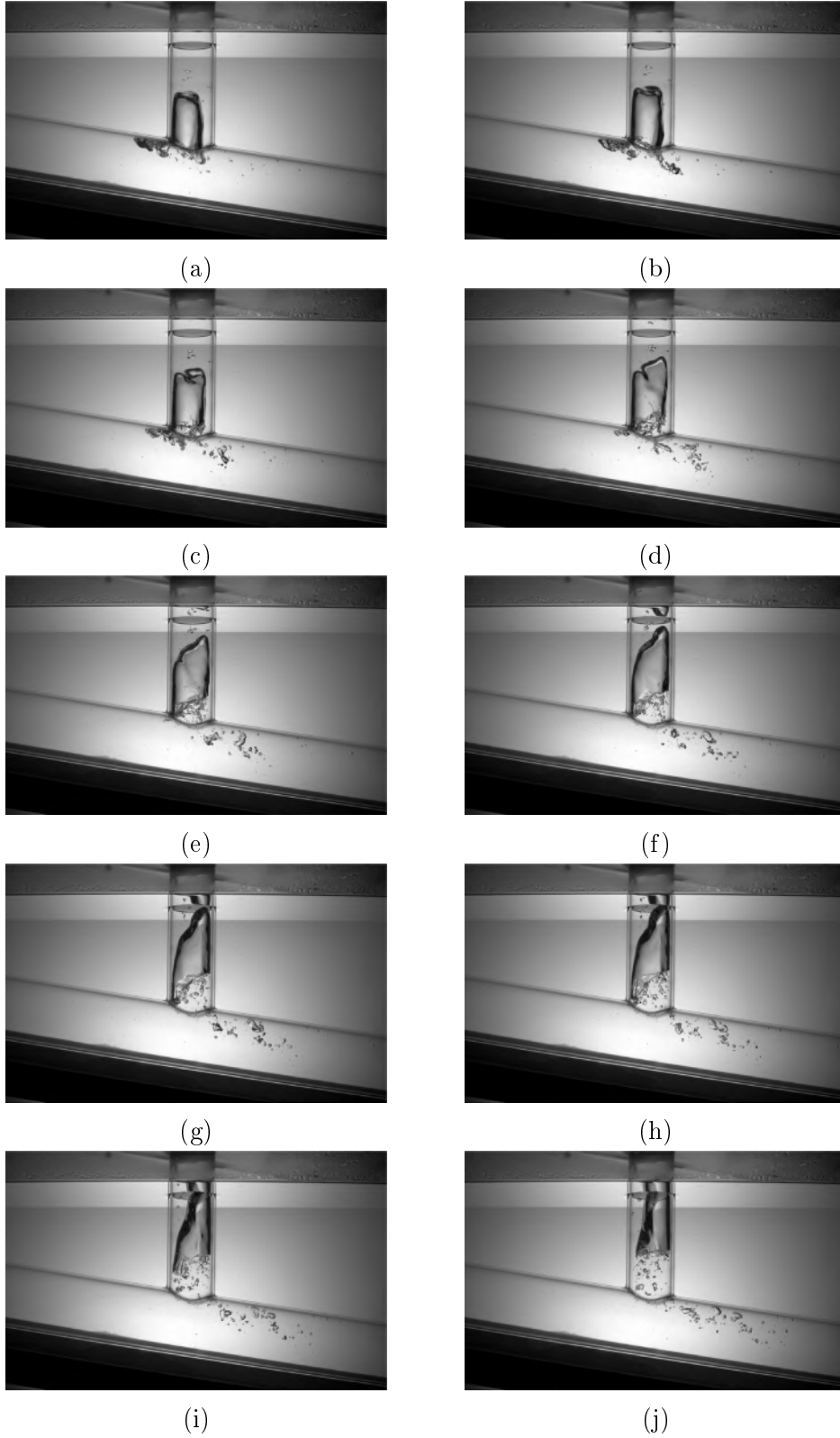


Figura 6.25: Exemplo da recirculação presente logo após a junção T ($Q_{L1} = 11,2m^3/h$ e $Q_{G1} = 0,13m^3/h$). Intervalo de tempo entre as imagens de 0,022 segundos.

Na sequência de imagens apresentadas na Figura 6.25, pode-se observar ou-

tros fenômenos interessantes: a deformação do nariz da bolha que é separada pela junção e a recirculação de sua esteira na perna vertical próxima a junção. Este efeito é observado para vazões maiores de líquido na entrada, casos de $Q_{L1} = 11,2m^3/h/Q_{G1} = 0,14m^3/h$ e $Q_{L1} = 13,7m^3/h/Q_{G1} = 0,13m^3/h$, onde não há formações de bolhas fixas na entrada da junção.

A entrada da bolha se dá pelo lado esquerdo da junção e a mesma desloca-se para o lado direito da junção, ao mesmo passo que sobe pela tubulação vertical. Como observado no estudo monofásico, a maior velocidade é exatamente no lado direito da perna vertical, assim, explicando a tendência da bolha de se deslocar para esta extremidade. A deformação do nariz da bolha pode ser explicada pela descida do pistão líquido formado entre as bolhas na perna vertical.

Avaliou-se o comportamento das bolhas não separadas pela junção, bolhas presentes no trecho 2. A Figura 6.26 ilustra o fenômeno de quebra das bolhas, onde devido a região de recirculação, é possível observar a formação de bolhas menores provenientes da bolha original.

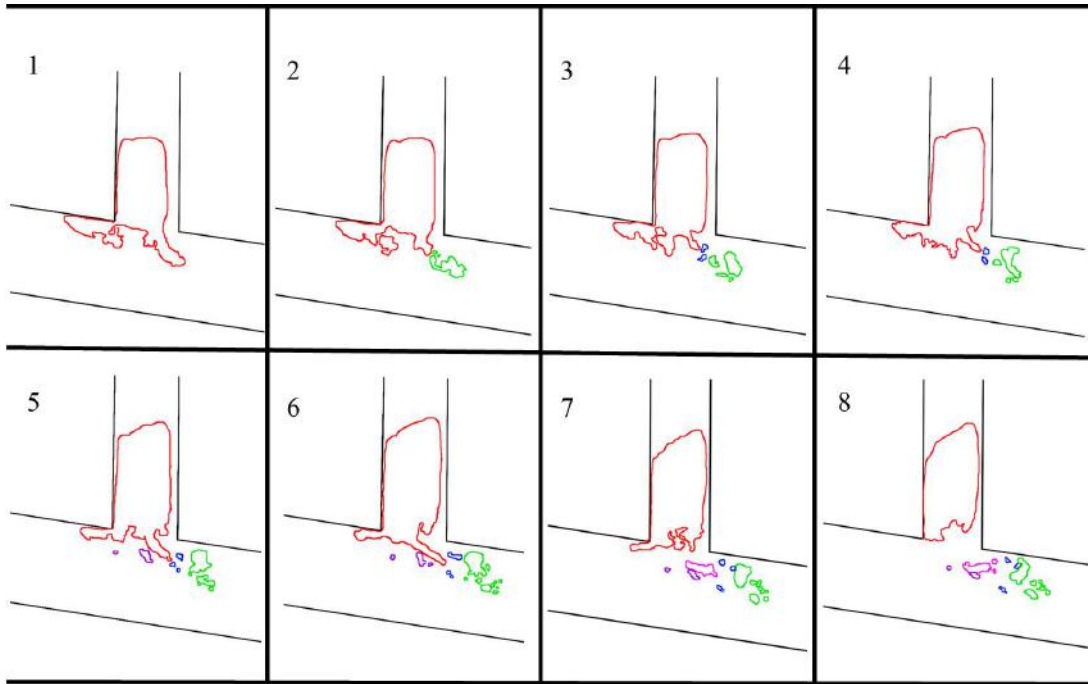


Figura 6.26: Avaliação das bolhas não separadas pela junção. $Q_{L1} = 11,2m^3/h$ e $Q_{G1} = 0,13m^3/h$, intervalo entre as imagens de 0,011 segundos.

A caracterização da bolha antes de sua separação pela junção T foi realizada utilizando também um algoritmo de detecção de contornos através da rotina de *MatLab* apresentada no estudo de (MATAMOROS *et al.*, 2013). Desse modo, somente os casos 4, 5 e 6 foram analisados, únicos que apresentaram uma única bolha se aproximando da junção por vez. A Tabela 6.6 sintetiza os resultados obtidos nesta análise.

Tabela 6.6: Caracterização da Bolha

	Caso 4	Caso 5	Caso 6
Frequência (<i>bolhas/s</i>)	3,33E-01	1,04E+00	7,03E-01
Velocidade Média (<i>m/s</i>)	2,42E-01	4,58E-01	3,19E-01
Comprimento Médio (<i>m</i>)	1,39E-01	8,20E-02	6,16E-02
Volume Médio (<i>m</i> ³)	1,32E-04	4,88E-05	2,72E-05
Área Seca Média (<i>m</i> ²)	8,84E-03	4,38E-03	3,07E-03
Área Molhada Média (<i>m</i> ²)	2,18E-02	1,41E-02	1,05E-02

Definiu-se área seca e a área molhada como as áreas da tubulação em contato com a fase gasosa e com a fase líquida, respectivamente.

Os casos 4 e 5 possuem a mesma vazão de entrada de gás. Uma vez que, a velocidade do líquido no caso 5 é maior que no caso 4, a velocidade da bolha também apresentou o mesmo comportamento. Por outro lado, ao analisar o volume e o comprimento médio, observa-se que ao aumentar a vazão de líquido para uma mesma vazão de gás, ocorre a diminuição do tamanho das bolhas formadas antes da junção T, esse fato ocorre pois a fase gasosa é arrastada pela fase líquida, diminuindo a coalescência. O caso 6 apresenta o bolhas com tamanho menores, uma vez que, a vazão de gás é menor do que nos outros casos. Assim, a velocidade média é maior quando comparada ao caso 4, mesmo este tendo uma maior velocidade da fase líquida.

No que tange a frequência da passagem de bolhas, o mesmo raciocínio utilizado anteriormente pode ser aplicado. Para uma mesma vazão de gás, casos 4 e 5, a maior frequência de bolhas se dá para o caso que apresenta maior velocidade da fase líquida, caso 5. O caso 6 apresenta maior frequência de passagem de bolhas que o caso 4, pois o tamanho das mesmas são menores, assim deslocando-se mais rapidamente até a junção.

6.2.5 Medições com *Shadow Sizing* e PIV

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos a partir da análise de Velocimentria por Partículas - PIV combinados com a técnica de *Shadow Sizing* para escoamentos bifásicos, onde os casos das vazões foram listados anteriormente na Tabela 4.1. É importante ressaltar que para os casos analisados nos balanços mássicos e de pressão não foi possível fazer a análise de PIV devido a grande quantidade de bolhas dispersas no escoamento, dificultando assim, a visualização das partículas de rodâmina, dispersas no escoamento.

A aplicação da técnica de velocimetria por partícula no trecho vertical da junção T, se mostrou ineficiente, pois o plano de iluminação do laser está localizado no mesmo sentido do escoamento (de baixo para cima), assim, quando há a passagem de

bolhas por esta seção as mesmas formam sombras na região de fase contínua, impossibilitando a visualização das partículas de rodâmina. A Figura 6.27 pré processada ilustra este efeito descrito anteriormente.

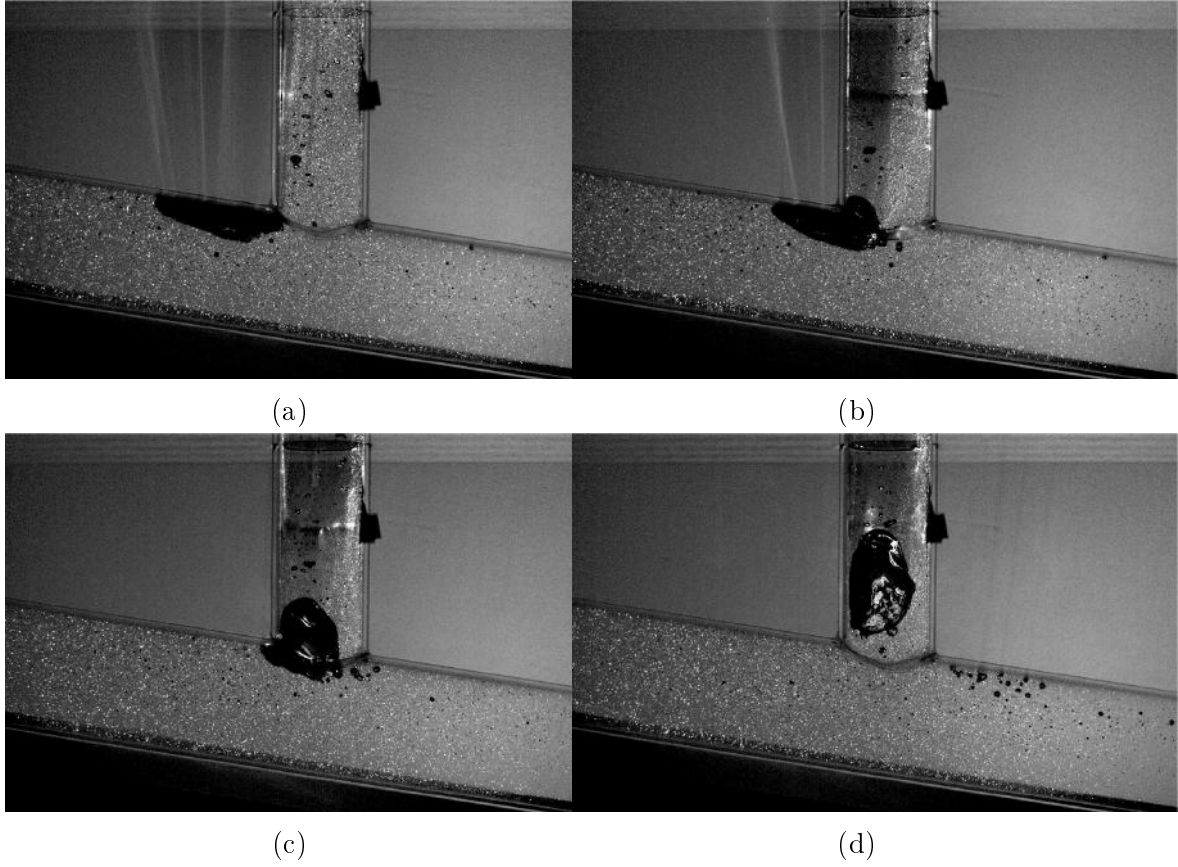


Figura 6.27: Exemplo da sombra formada no trecho da perna vertical ($Q_{L1} = 13,7m^3/h$ e $Q_{G1} = 0,13m^3/h$).

Inicialmente, serão apresentados os resultados dos casos de vazões que resultaram em bolhas fixas antes da junção T, onde o final e a esteira dessas bolhas são captadas nos ensaios realizados: Casos 1, 2, 3/7. Posteriormente, analisou-se as imagens dos casos 8 e 9, onde a vazão de gás é maior que as testadas nos outros casos, $Q_{G1} = 0,20m^3/h$ e $Q_{G1} = 0,27m^3/h$, respectivamente. Finalmente, os casos 4, 5 e 6, onde não há formação de bolhas fixas no trecho inclinado antes da junção, foram estudados.

Nas Figuras 6.28, 6.29 e 6.30 são apresentados exemplos do padrão observado e o campo de velocidade médio. A escala de cores dos vetores de velocidade possuem a menor velocidade de $0,81 \times 10^{-3}m/s$ representada pela cor azul e a maior escala de $1,61m/s$ representada pela cor vermelha.

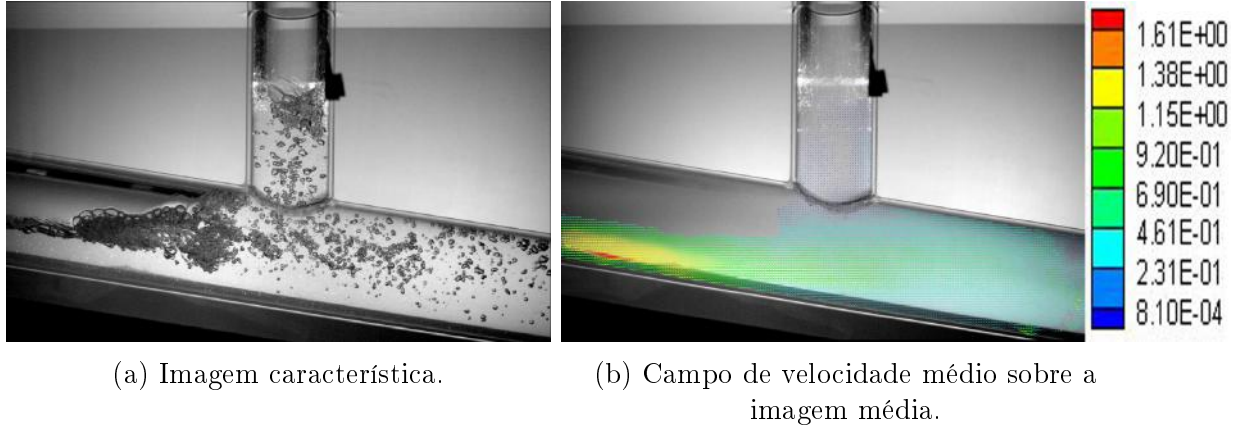


Figura 6.28: Caso 1 ($Q_{L1} = 6,0m^3/h$ e $Q_{G1} = 0,13m^3/h$).

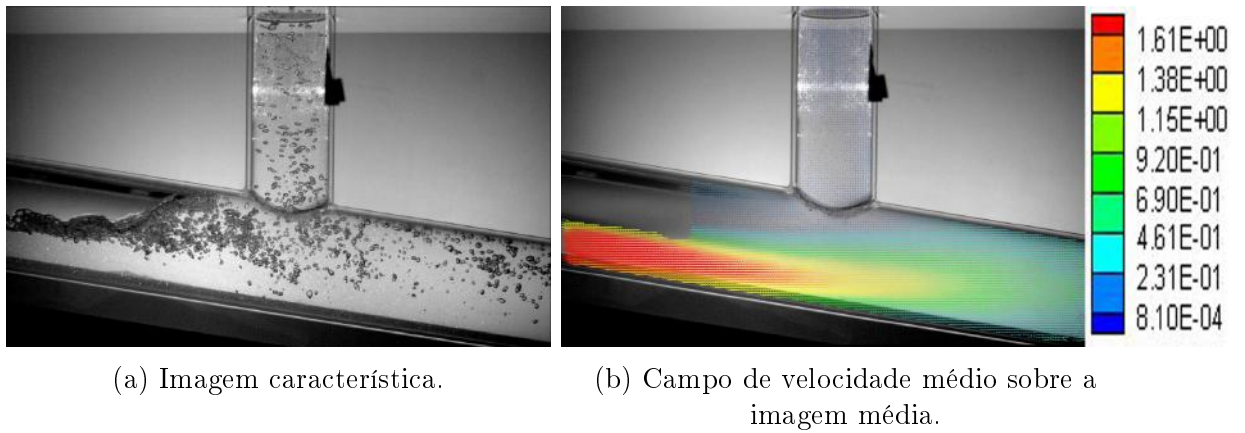


Figura 6.29: Caso 2 ($Q_{L1} = 8,0m^3/h$ e $Q_{G1} = 0,13m^3/h$).

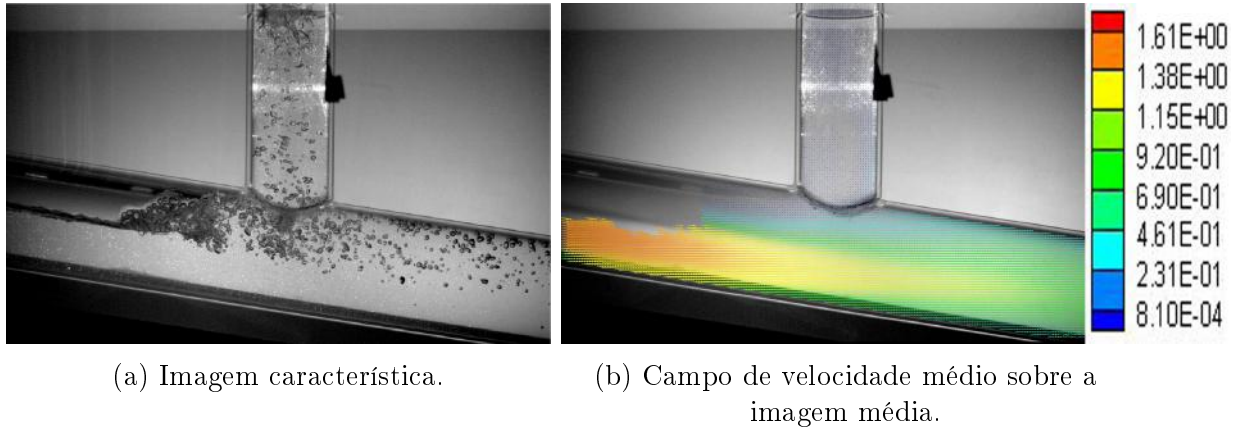


Figura 6.30: Caso 3/7 ($Q_{L1} = 10,1m^3/h$ e $Q_{G1} = 0,13m^3/h$).

Nas Figuras 6.31 e 6.32 são apresentadas exemplos do padrão observado e o campo de velocidade médio do escoamento. A escala de cores dos vetores de velocidade possuem a menor velocidade de $0,79 \times 10^{-3}m/s$ e $0,81 \times 10^{-3}m/s$ representadas pela cor azul e a maior escala de $0,92m/s$ e $1,61m/s$, representadas pela cor vermelha, respectivamente.

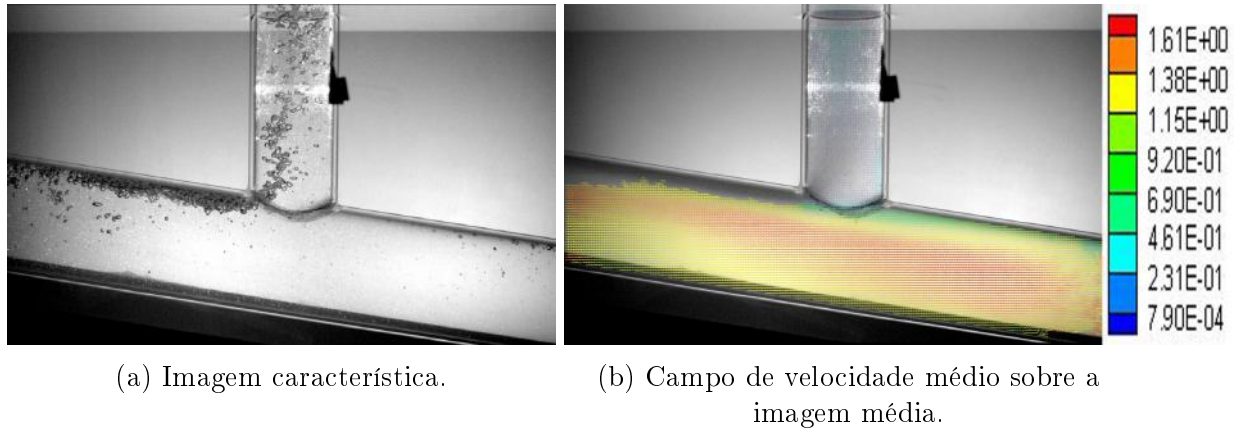


Figura 6.31: Caso 8 ($Q_{L1} = 10,1m^3/h$ e $Q_{G1} = 0,20m^3/h$).

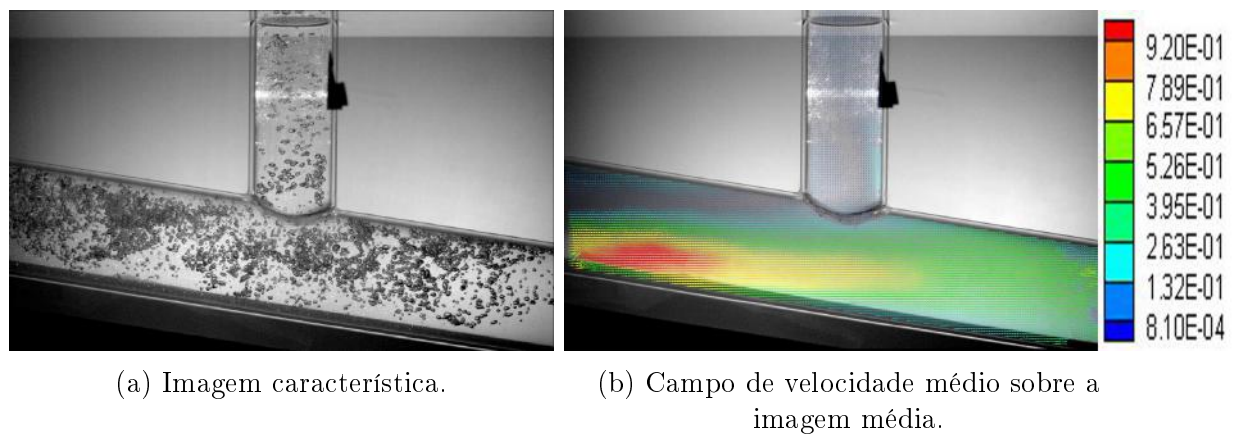
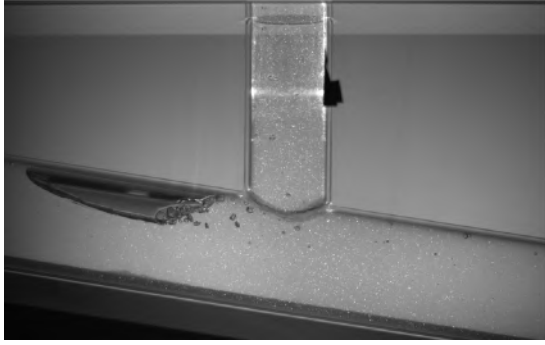


Figura 6.32: Caso 9 ($Q_{L1} = 10,1m^3/h$ e $Q_{G1} = 0,27m^3/h$).

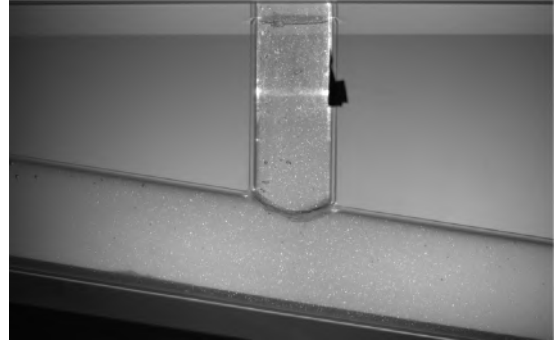
Foi observado para os casos 2 e 3/7, houve uma diferença na altura de líquido ocupada na seção inclinada, logo abaixo da bolha. No caso 2, a bolha tem maior diâmetro que no caso 3/7, este fato contribui para o aumento de velocidade observado nas imagens.

Para os casos 4, 5 e 6, observou-se a passagem de bolhas de Taylor pela junção, sendo as imagens e campos de velocidade médios característicos apresentados nas Figuras 6.33, 6.34 e 6.35. A escala de cores dos vetores de velocidade para os casos 4 e 6 possuem a menor velocidade de $1,6 \times 10^{-3}m/s$ representada pela cor azul e a maior escala de $0,98m/s$ representada pelo cor vermelha. Já para o caso 5, esta escala é de $1,9 \times 10^{-3}m/s$ e $1,13m/s$, respectivamente.

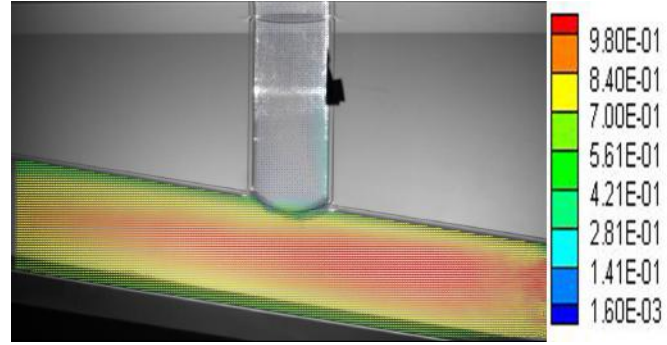
Para caracterizar qualitativamente o campo de velocidade do escoamento durante a passagem de bolhas, fez-se uma análise pontual para os casos 4 e 5 (Figura 6.36 e 6.37), onde as escalas de velocidade são as mesmas utilizadas anteriormente. Percebe-se pelas sequências de imagens que durante a passagem das bolhas, a fase contínua logo abaixo desta tem um ganho de velocidade, uma vez que, há uma compressão desta devido a passagem da bolha.



(a) Bolha característica.

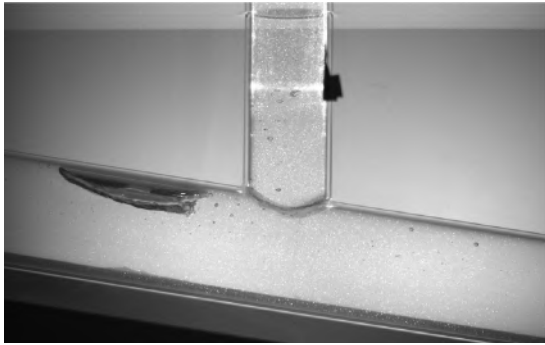


(b) Imagem característica sem bolha.

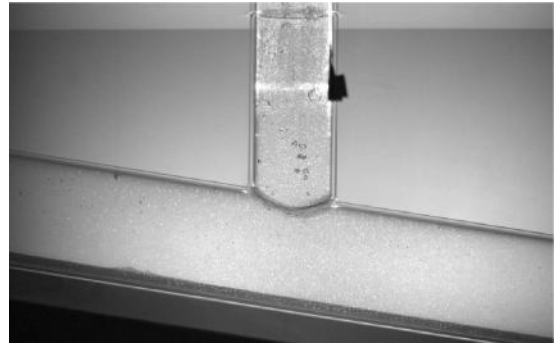


(c) Campo de velocidade médio sobre a imagem média.

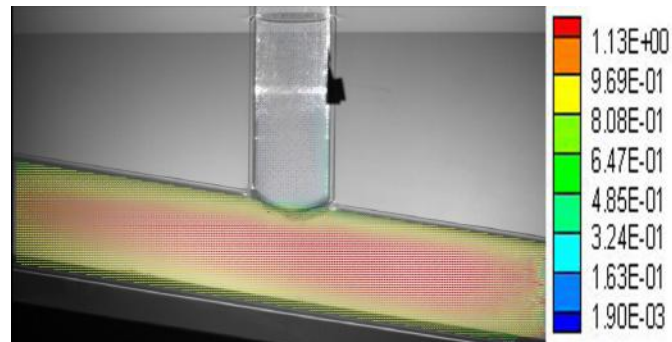
Figura 6.33: Caso 4 ($Q_{L1} = 11,2m^3/h$ e $Q_{G1} = 0,13m^3/h$).



(a) Bolha característica.



(b) Imagem característica sem bolha.



(c) Campo de velocidade médio sobre a imagem média.

Figura 6.34: Caso 5 ($Q_{L1} = 13,7m^3/h$ e $Q_{G1} = 0,13m^3/h$).

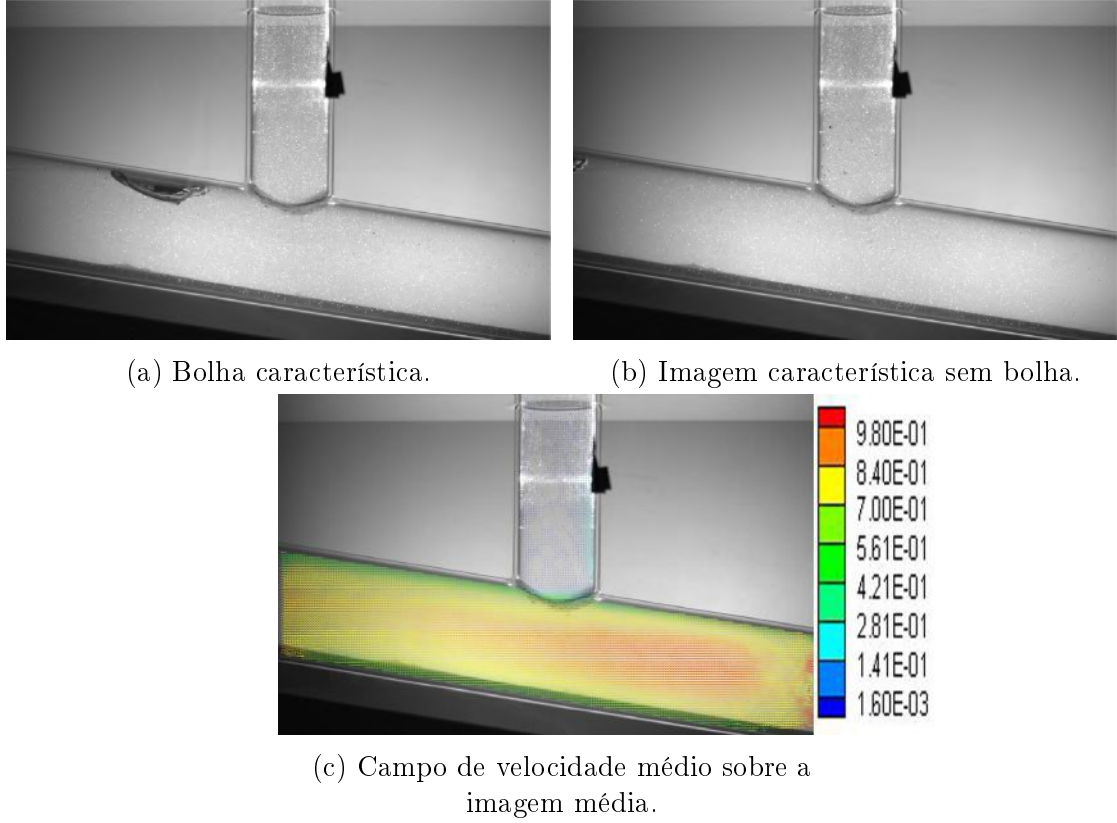


Figura 6.35: Caso 6 ($Q_{L1} = 10,1m^3/h$ e $Q_{G1} = 0,07m^3/h$).

Analisando, mais especificamente, o comportamento da fase não separada (trecho 2), foi observada uma região de recirculação logo após a junção, o que justifica a quebra de bolhas apresentada na seção anterior. A Figura 6.38 mostra o campo de velocidade instantâneo da passagem de uma bolha pela junção. Para melhor avaliar a região de recirculação, nestas imagens foram observadas as linhas de corrente, onde foi possível notar os vórtices no trecho 2, logo após a junção (Figura 6.39). Ambas as Figuras apresentam a mesma escala de cores de velocidade.

De posse dos campos médios de velocidade, escolheu-se um ponto antes da junção para avaliar o perfil de velocidade nos diferentes casos de vazões. Este perfil dista, aproximadamente, $60mm$ do início da junção T. A Figura 6.40a apresenta o perfil de velocidade para os casos que possuem a vazão de gás de entrada fixa, $Q_{G1} = 0,13m^3/h$, já a Figura 6.40b apresenta o perfil de velocidade para os casos de vazão de líquido fixas, $Q_{L1} = 10,1m^3/h$, sendo $r/D = 0$ a parte inferior da tubulação inclinada.

Pode-se observar que o fator determinante para a variação do perfil de velocidade é a posição da bolha fixa ou não próxima à junção T. Sendo assim, avaliou-se os perfis de velocidade para casos que apresentaram um padrão de escoamento similar a montante da junção.

A Figura 6.41 apresenta os perfis para os casos 1, 2 e 3/7, onde há a presença de

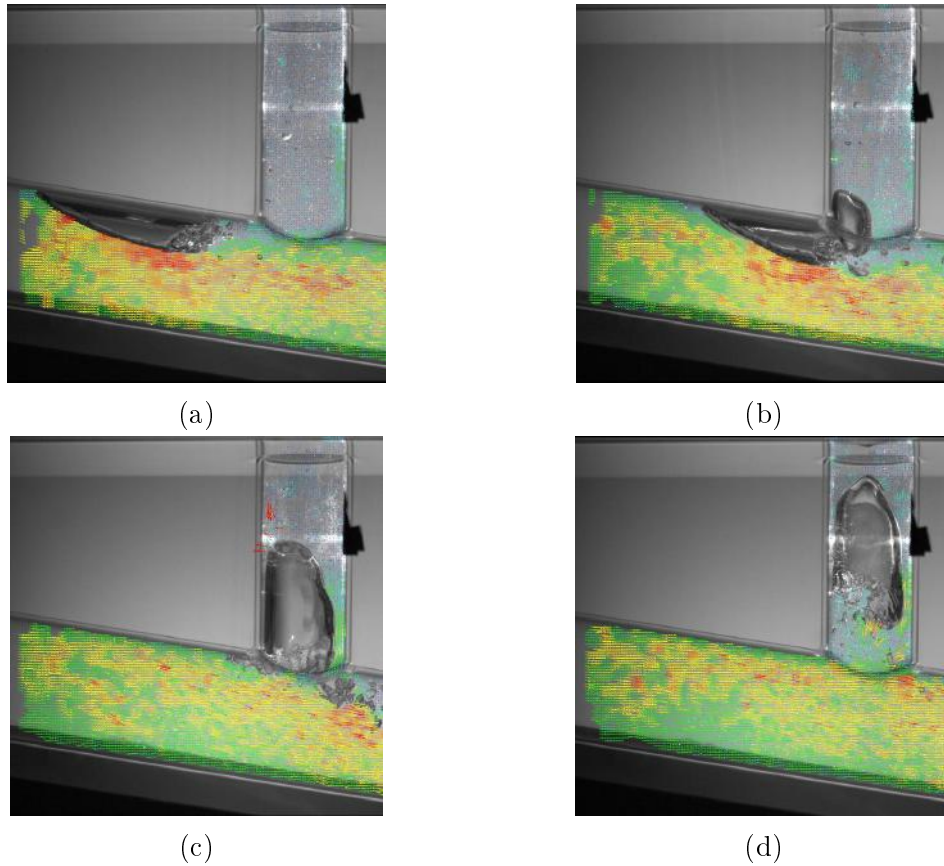
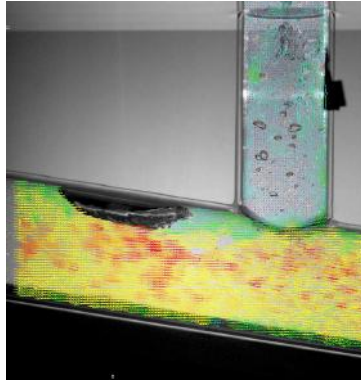


Figura 6.36: Exemplo do campo de velocidade instantâneo para a passagem de uma bolha ($Q_{L1} = 11,2m^3/h$ e $Q_{G1} = 0,13m^3/h$).

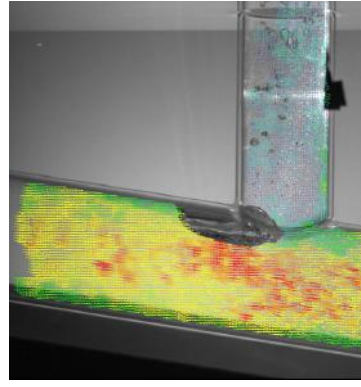
uma bolha fixa antes da junção. Para o caso 1, o perfil avaliado cruza a seção da fase gasosa, tendo o filme de líquido altura equivalente a 40% da tubulação inclinada. Tanto o perfil do caso 2, quanto o do caso 3/7, ficaram localizados na esteira da bolha fixa, sendo perceptível a oscilação e diminuição da velocidade média no trecho superior da tubulação.

A Figura 6.42 apresenta os perfis para os casos 8 e 9, onde há a presença de bolhas dispersas antes da junção. Pode-se observar pelo perfil de velocidade do caso 8 que o filme de líquido atinge 80% da tubulação, acima deste valor há a presença de bolhas. Para o caso 9, como a vazão de gás de entrada é a mais alta dos casos, observa-se uma grande quantidade de bolhas dispersas ao longo da tubulação, porém foi possível observar pelo perfil de velocidade que as mesmas tendem a se concentrar na região de $r/D \approx 80\%$ da tubulação (velocidade da fase contínua tende a zero).

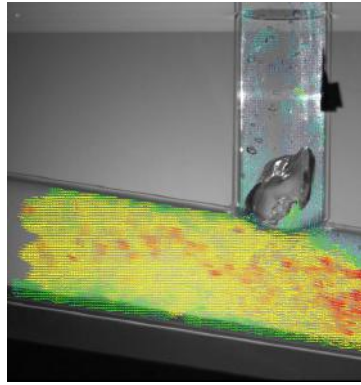
A Figura 6.43 apresenta os perfis para os casos 4, 5 e 6, onde não há presença de bolhas fixas antes da junção, somente passagens de bolhas com frequências intermitentes. Assim, o perfil se assemelha bastante ao observado nos ensaios monofásicos, tendo maiores velocidades o perfil com maior vazão de líquido (caso 5).



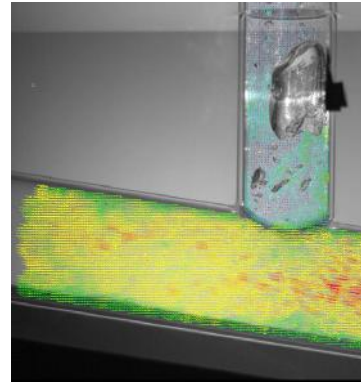
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 6.37: Exemplo do campo de velocidade instantâneo para a passagem de uma bolha ($Q_{L1} = 13,7m^3/h$ e $Q_{G1} = 0,13m^3/h$).

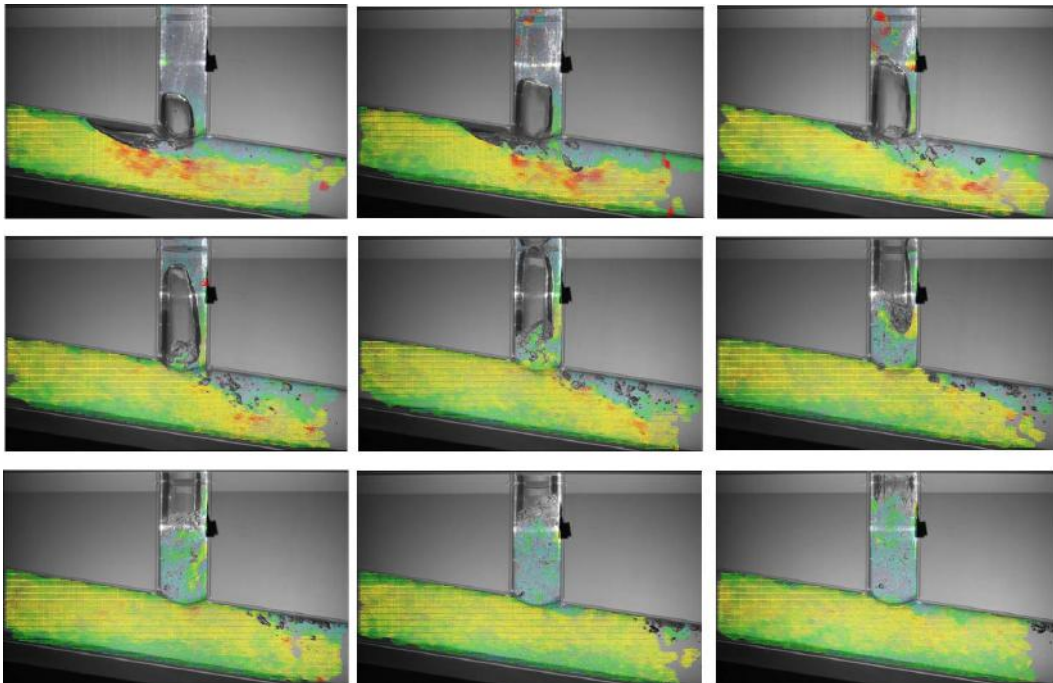


Figura 6.38: Região de recirculação após a junção T. $Q_{L1} = 11,2m^3/h$ e $Q_{G1} = 0,13m^3/h$, intervalo entre as imagens de 0,067 segundos.

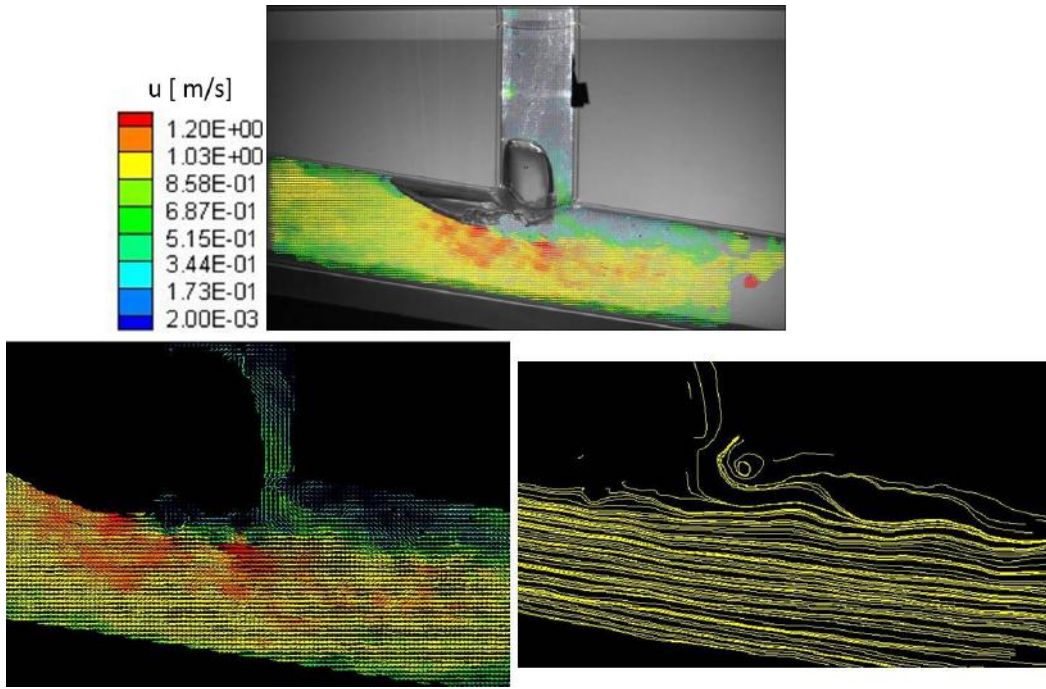


Figura 6.39: Avaliação da recirculação no trecho 2. $Q_{L1} = 11,2\text{m}^3/\text{h}$ e $Q_{G1} = 0,13\text{m}^3/\text{h}$.

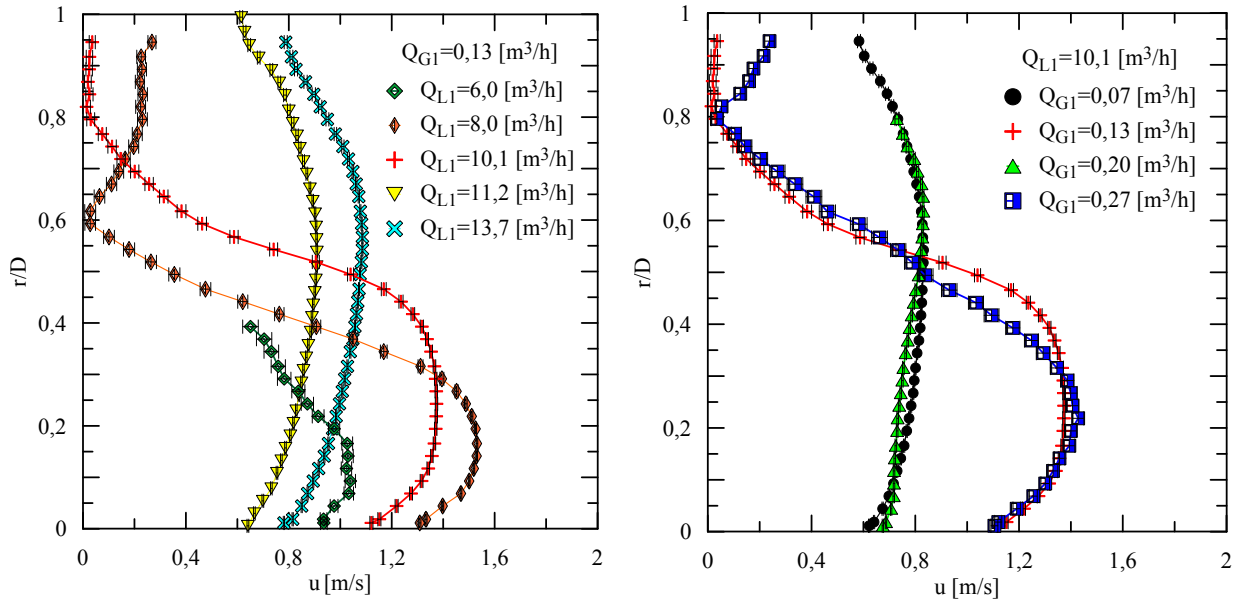


Figura 6.40: Perfis de velocidade para estudo bifásico.

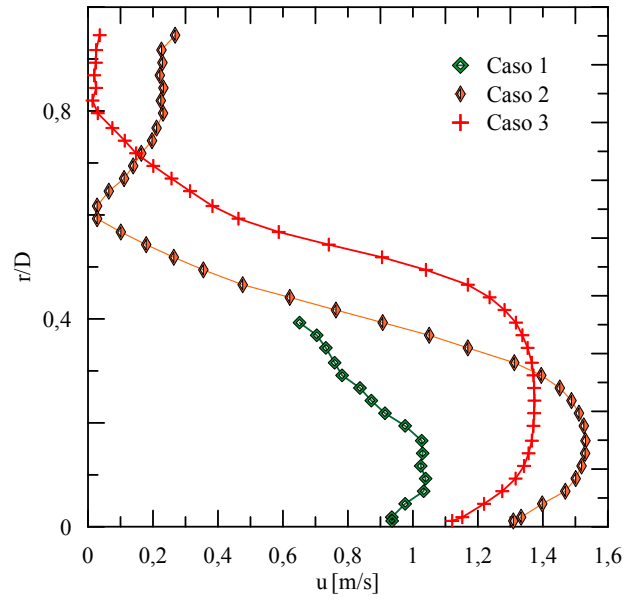


Figura 6.41: Perfis de velocidade para os casos 1, 2 e 3/7.

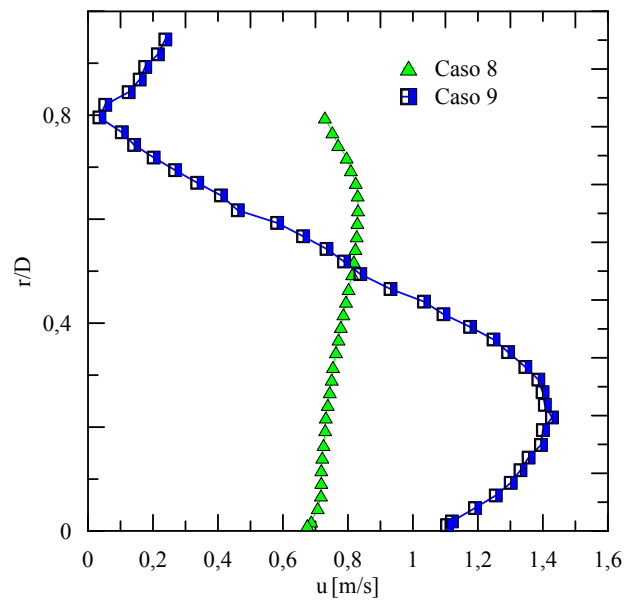


Figura 6.42: Perfis de velocidade para os casos 8 e 9.

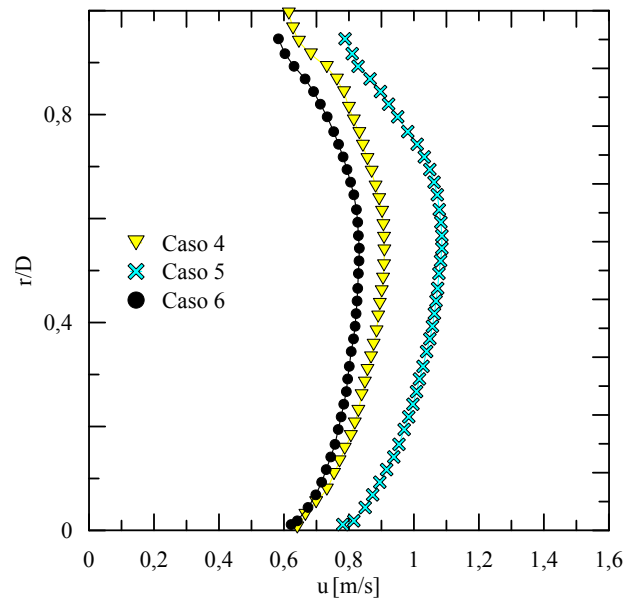


Figura 6.43: Perfis de velocidade para os casos 4, 5 e 6.

Capítulo 7

Análise dos Resultados

7.1 Fenômeno Intermitente

O escoamento apresenta um comportamento extremamente intermitente, principalmente para baixas vazões de líquido (inferiores a $8 \text{ m}^3/h$), como reportado por BALLYK e SHOUKRI (1990). No trecho inclinado após a junção T, as bolhas de ar tendem a deslocar-se no sentido contrário ao do escoamento principal, por ação do empuxo, e assim coalescem e sobem rumo ao trecho 3 (perna vertical). Neste momento, a coluna de líquido desce, restando somente gás na seção do trecho 3 e apenas líquido no trecho 2. Este regime transiente na saída inferior pode ser observado pela sequência de imagens apresentada na Figura 7.1.

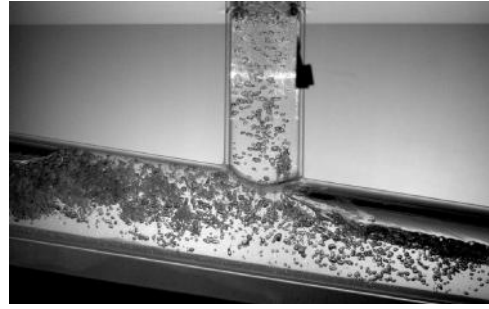
Ainda é possível observar este fenômeno transiente quando é avaliada a pressão na tubulação e a vazão da fase gasosa separada na junção T (trecho 3). A Figura 7.2 ilustra a variação da pressão na tubulação quando ocorre o retorno da bolha do trecho inferior para a junção.

O fenômeno observado na Figura 7.1, também ocorre com a bolha localizada antes da junção T (trecho 1) conforme ilustrado na Figura 7.3. A esteira da primeira bolha alimenta a segunda bolha, quando a segunda possui tamanho suficientemente grande ela vai contra a direção do escoamento e une-se com a primeira bolha, fazendo com que o pistão de líquido existente entre elas chegue à junção T, aumentando assim, a coluna de água na perna vertical, posteriormente, a segunda bolha volta a se formar, tornando este fenômeno cíclico. A Figura 7.4 ilustra este fenômeno na junção.

Esse fenômeno intermitente é observado no medidor de vazão na saída do trecho 2 (Coriolis), uma vez que a densidade aumenta quando há somente escoamento de líquido.



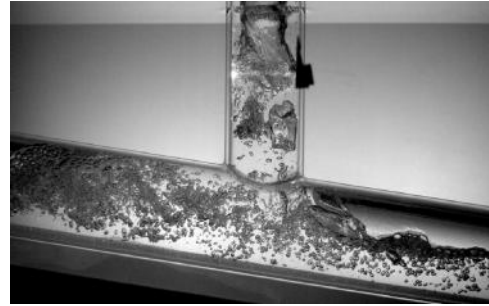
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)



(h)



(i)



(j)

Figura 7.1: Exemplo de bolha retornando para a junção T, $Q_{L1} = 6,0m^3/h$ e $Q_{G1} = 0,13m^3/h$.

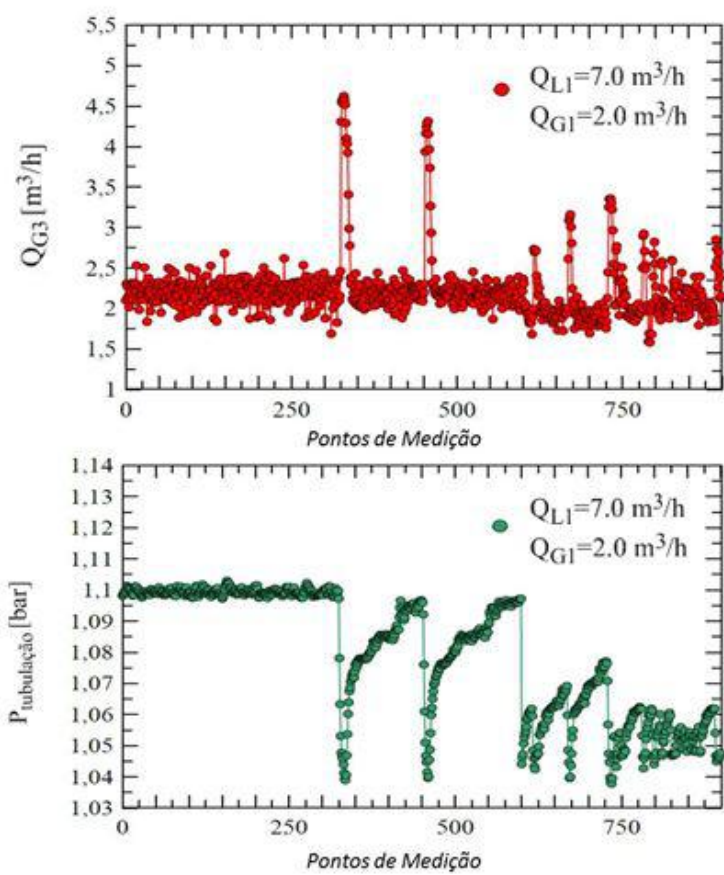


Figura 7.2: Oscilação de pressão na tubulação inclinada devido ao fenômeno transiente.

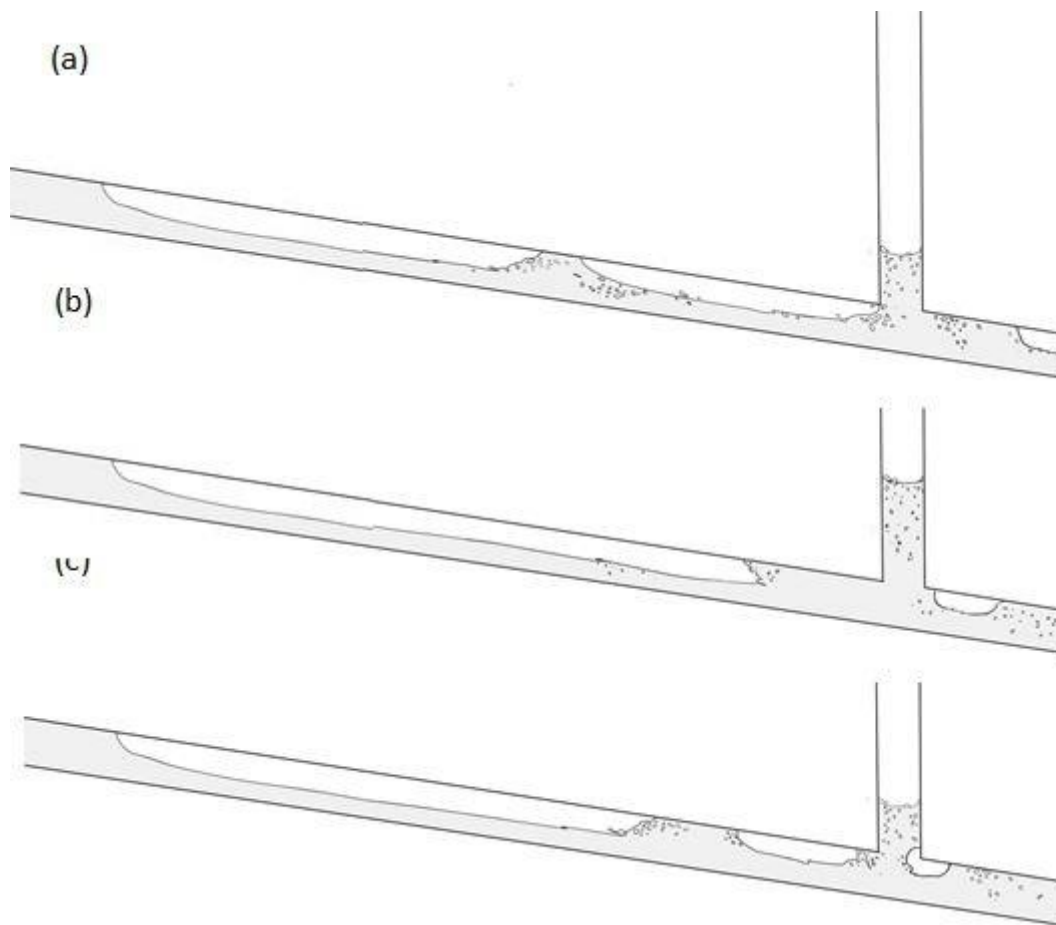


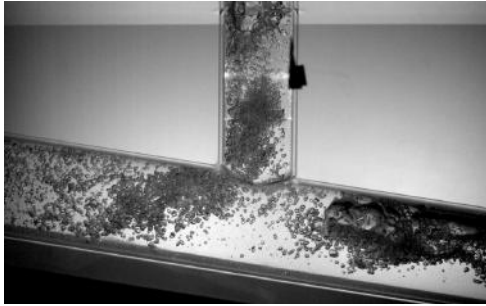
Figura 7.3: Fenômeno observado na entrada do aparato para vazões de $Q_{L1} = 6,0m^3/h$ e $Q_{G1} = 0,13m^3/h$.



(a)



(b)



(c)



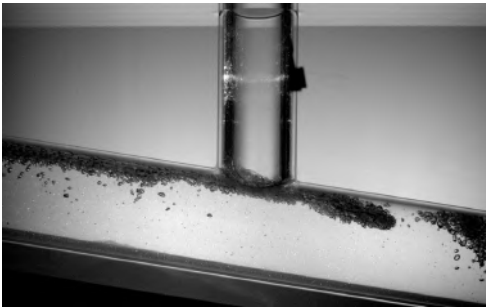
(d)



(e)



(f)



(g)



(h)



(i)



(j)

Figura 7.4: Exemplo de pistão de líquido chegando na junção, $Q_{L1} = 6,0m^3/h$ e $Q_{G1} = 0,13m^3/h$.

Capítulo 8

Conclusões

O objetivo deste trabalho reside em observar e descrever o fenômeno da separação bifásica em uma junção T, para diferentes vazões de gás e líquido, considerando um ângulo de inclinação de 10 graus. Os resultados obtidos a partir deste estudo serão utilizados futuramente para o desenvolvimento e validação de um modelo simplificado que permitirá projetar, com embasamento teórico, separadores tubulares para escoamentos gás-líquido.

Construído para o presente estudo, este aparato experimental opera em circuito fechado. Medições globais de vazão, queda de pressão e perfis de velocidade e caracterização da fase gasosa não separada foram realizadas. O comportamento transiente do escoamento foi quantificado por meio de medições de pressão e de densidade. Os experimentos foram realizados no Núcleo Interdisciplinar de Dinâmica dos Fluidos da COPPE-UFRJ (NIDF). A velocidade média e as estatísticas turbulentas da fase líquida foram caracterizadas por meio de Velocimetria por Imagem de Partículas (VIP ou PIV). Um sistema de detecção de imagens por sombras (*Shadow Sizer*) e técnicas baseadas em laser foram usadas para caracterizar as propriedades da fase gasosa, tais como o diâmetro da bolha e velocidade das bolhas.

Depois de uma revisão da literatura, nenhuma junção do tipo T semelhante à investigada neste trabalho foi encontrada, sendo de maior importância a realização da análise de incertezas para garantir a credibilidade e confiabilidade dos resultados obtidos. Sendo assim, este estudo visa à compreensão dos mecanismos de separação, a fim de maximizar a separação de gás, sendo uma contribuição relevante tanto sob o aspecto fundamental quanto aplicado. Os dados experimentais gerados neste trabalho permitirão a validação de futuros modelos teóricos, visando o projeto de separadores mais eficientes, além de prever com segurança o seu desempenho para diferentes condições de aplicação.

Para os ensaios de balanço mássico e análise das pressões, casos distintos de gás-líquido foram utilizados, onde variou-se as vazões de gás de 1,7 a 7,5 m^3/h (condições de pressão e temperatura no Apêndice C) e de líquido de 8,0 a 14,0 m^3/h , tendo o

padrão de escoamento na entrada e na saída da junção sempre estratificado.

Pelos resultados dos ensaios referentes ao balanço mássico, concluiu-se que quanto menor a vazão de líquido na entrada da junção, mais eficiente é a separação, uma vez que, a fase gasosa permanece mais tempo exposta a junção (escoamento mais lento), facilitando a sua separação. Ainda foi possível observar que para vazões de líquido inferiores a $8,0 \text{ m}^3/h$, no trecho após a junção, há o retorno de bolhas de ar pela tubulação até a separação na mesma, fenômeno caracterizado também por GAVIOLI *et al.* (2016).

Foi possível observar uma tendência nas medições de pressão próxima a junção, tanto para o estudo monofásico quanto o bifásico.

Na separação de um escoamento gás-líquido em uma junção do tipo T, observou-se um comportamento extremamente intermitente, principalmente, na perna vertical da junção em estudo. Nos ensaios bifásicos realizados neste trabalho, notou-se uma grande oscilação da altura de líquido na perna vertical da junção, devido a característica do padrão de escoamento nela presente: pistonado e agitado. Neste contexto, as bolhas de Taylor se quebram no topo da perna vertical e o pistão de líquido tende a retornar para a tubulação descendente, contribuindo assim para a oscilação da pressão próxima a junção T. Devido a grande intermitência do fenômeno de separação e a alta recirculação na perna vertical, as pressões neste trecho devem ser medidas de forma representativa.

Devido a limitação do processamento das imagens, as vazões de gás utilizadas nos ensaios de visualização foram inferiores as vazões utilizadas nos ensaios de balanço mássico e pressão, onde utilizou-se de $0,07$ a $0,27 \text{ m}^3/h$ de gás para diferentes vazões de líquido. Os ensaios de visualização possibilitaram um maior entendimento do fenômeno da separação na junção T, tanto para o estudo monofásico quanto para o estudo bifásico, onde para diferentes casos de vazões na entrada foi possível observar padrões distintos antes da junção. No estudo monofásico observou-se um padrão similar de linhas de correntes observado também por ŠTIGLER *et al.* (2012) em um estudo sem inclinação. Foi possível caracterizar a fase gasosa não separada pela junção, fenômenos de recirculação que definem deformações nas bolhas e, também, a caracterização das velocidades para cada escoamento.

8.1 Sugestões Trabalhos Futuros

A apresentação dos resultados neste trabalho abre novas sugestões para trabalhos futuros, como:

- implementar as análises aqui realizadas para geometrias de junções T distintas, com angulações e diâmetros diferentes.
- para o estudo de balanço mássico, controlar abertura das válvulas de saída para avaliar melhor a separação pelo diferencial de pressão na tubulação.
- modelagem matemática para o comportamento da separação na junção em função de determinados parâmetros de entrada.
- aprimorar o sistema de retorno e separação da perna vertical, aumentando a capacidade do sistema para trabalhar com vazões maiores de líquido.
- processamento das imagens de PIV para avaliar a frequência de passagem de bolhas, tanto na entrada da junção como na perna.
- avaliar a recirculação próxima a junção com ensaios de visualização de maior resolução na parede da tubulação (anemometria laser doppler - LDA).
- avaliar a recirculação próxima a junção com ensaios de medição de pressão com maior frequência de aquisição de dados.
- validar simulações numéricas com os ensaios experimentais realizados.

Referências Bibliográficas

- ADRIAN, R. J., 1991, “Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics”, *Annual review of fluid mechanics*, v. 23, n. 1, pp. 261–304.
- AZZOPARDI, B. J., 1999, “Phase separation at T junctions”, *Multiphase Science and Technology*, v. 11, n. 4.
- AZZOPARDI, B., 1988, “Measurements and observations of the split of annular flow at a vertical T-junction”, *International journal of multiphase flow*, v. 14, n. 6, pp. 701–710.
- AZZOPARDI, B., SMITH, P., 1992, “Two-phase flow split at T junctions: effect of side arm orientation and downstream geometry”, *International journal of multiphase flow*, v. 18, n. 6, pp. 861–875.
- AZZOPARDI, B. T., WHALLEY, P., 1982, “The effect of flow patterns on two-phase flow in a T junction”, *International Journal of Multiphase Flow*, v. 8, n. 5, pp. 491–507.
- BAGCI, S., AL-SHAREEF, A., OTHERS, 2003, “Characterization of Slug Flow in Horizontal and Inclined Pipes”. In: *SPE Production and Operations Symposium*. Society of Petroleum Engineers.
- BAKER, G., CLARK, W., AZZOPARDI, B., et al., 2007, “Controlling the phase separation of gas–liquid flows at horizontal T-junctions”, *AIChE journal*, v. 53, n. 8, pp. 1908–1915.
- BAKER, G., CLARK, W., AZZOPARDI, B., et al., 2008, “Transient effects in gas–liquid phase separation at a pair of T-junctions”, *Chemical Engineering Science*, v. 63, n. 4, pp. 968–976.
- BAKER, G., 2003, *Separation and control of gas-liquid flows at horizontal T-junctions*. Tese de Doutorado, University of Nottingham.
- BALLYK, J., SHOUKRI, M., 1990, “On the development of a model for predicting phase separation phenomena in dividing two-phase flow”, *Nuclear engineering and design*, v. 123, n. 1, pp. 67–75.

- BARNEA, D., 1987, “A unified model for predicting flow-pattern transitions for the whole range of pipe inclinations”, *International Journal of Multiphase Flow*, v. 13, n. 1, pp. 1–12.
- BIPM, I., IFCC, I., IUPAC, I., et al., 2008, “The international vocabulary of metrology—basic and general concepts and associated terms (VIM), 3rd edn. JCGM 200: 2012”, *JCGM (Joint Committee for Guides in Metrology)*.
- BONNECAZE, R., ERSKINE, W., GRESKOVICH, E., 1971, “Holdup and pressure drop for two-phase slug flow in inclined pipelines”, *AIChE Journal*, v. 17, n. 5, pp. 1109–1113.
- CARNEIRO, J. N. E., 2006. “Simulação numérica de escoamentos bifásicos no regime de golfadas em tubulações horizontais e levemente inclinadas”. .
- CHISHOLM, D., 1967, *Pressure losses in bends and tees during steam-water flow*. National Engineering Laboratory.
- DA CAMARA MONTEIRO, P. C., 2014, *Vanessa Galdino Pessanha*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- DE OLIVEIRA, R. P., 2009, *CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DAS PROPRIEDADES DINÂMICAS DE ESCOAMENTOS PISTONADOS EM TUBOS VERTICAIS*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- DO BRASIL, N. I., ARAÚJO, M. A. S., DE SOUSA, E. C. M., 2000, *Processamento de petróleo e gás*. Grupo Gen-LTC.
- DUVENECK, G., BOPP, M., EHRAT, M., et al., 2003, “Two-photon fluorescence excitation of macroscopic areas on planar waveguides”, *Biosensors and Bioelectronics*, v. 18, n. 5, pp. 503–510.
- DYNAMICS, D., 2002, “Planar-LIF Software - Liquid Applications”. In: *Installation and Users Guide*.
- FOX, R. W., PRITCHARD, P. J., MCDONALD, A. T., 2000, *Introdução À Mecânica Dos Fluidos* . Grupo Gen-LTC.
- FU, T., MA, Y., FUNFSCHILLING, D., et al., 2011, “Dynamics of bubble breakup in a microfluidic T-junction divergence”, *Chemical engineering science*, v. 66, n. 18, pp. 4184–4195.

- GAVIOLI, Y. S., LOUREIRO, J. B. R., SILVA FREIRE, A. P., et al., 2016, “Experimental study of gas-liquid flow separation at a T-Junction”. In: *Proceedings of the 16th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, ENCIT*.
- GOULD, T. L., TEK, M. R., KATZ, D. L., et al., 1974, “Two-phase flow through vertical, inclined, or curved pipe”, *Journal of Petroleum Technology*, v. 26, n. 08, pp. 915–926.
- GUERRA, L. A. D. O., 2017, *Análise Experimental do Efeito do ângulo de injeção de gás em um escoamento vertical ascendente de líquido*. Tese de Mestrado, Programa de Engenharia Mecânica COPPE.
- GUM, 2008, “Inmetro(Ed.), JCGM 100:2008 - GUM 1995 com pequenas alterações”. In: *Avaliação de medição - Guia para a expressão de incerteza de medição*.
- HWANG, S., SOLIMAN, H., LAHEY, R., 1988, “Phase separation in dividing two-phase flows”, *International journal of multiphase flow*, v. 14, n. 4, pp. 439–458.
- JOHNSON, C. B., BUSHNELL, D. M., 1969, *Power-Law Velocity-Profile-Exponent Variations With Reynolds Number, Wall Cooling, and Mach Number in a Turbulent Boundary Layer*, v. 5753. National Aeronautics and Space Administration.
- LAHEY, R., 1986, “Current understanding of phase separation mechanisms in branching conduits”, *Nuclear Engineering and Design*, v. 95, pp. 145–161.
- MA, Y.-P., PEI, B.-S., LIN, W.-K., et al., 1990, “Analysis of a fluid-mechanic model of a horizontal tee-junction”, *Nuclear technology*, v. 92, n. 1, pp. 134–140.
- MADDEN, J., ST. PIERRE, C., 1969, “Two-phase air-water flow in a slot-type distributor”. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Conference Proceedings*, v. 184, pp. 175–184. SAGE Publications Sage UK: London, England.
- MANDHANE, J., GREGORY, G., AZIZ, K., 1974, “A flow pattern map for gas—liquid flow in horizontal pipes”, *International Journal of Multiphase Flow*, v. 1, n. 4, pp. 537–553.
- MARTI, S., SHOHAM, O., 1997, “A unified model for stratified-wavy two-phase flow splitting at a reduced T-junction with an inclined branch arm”, *International journal of multiphase flow*, v. 23, n. 4, pp. 725–748.

- MATAMOROS, L. M. C., LOUREIRO, J. B. R., SILVA FREIRE, A. P., 2013, *Morfologia de Bolhas Isoladas em Escoamentos Pistonados Horizontais*. Tese de Mestrado, UFRJ - COPPE - Programa de Engenharia Mecânica, Rio de Janeiro, RJ, Brazil.
- MUDDE, R., GROEN, J., VAN DEN AKKER, H., 1993, “Two-phase flow redistribution phenomena in a large T-junction”, *International journal of multiphase flow*, v. 19, n. 4, pp. 563–573.
- MUKHERJEE, H., 1980, “AN EXPERIMENTAL STUDY OF INCLINED TWO-PHASE FLOW.” .
- PENMATCHA, V., ASHTON, P., SHOHAM, O., 1996, “Two-phase stratified flow splitting at a T-jun”, *International journal of multiphase flow*, v. 22, n. 6, pp. 1105–1122.
- RAFFEL, M., WILLERT, C. E., KOMPENHANS, J., et al., 2007, *Particle image velocimetry: a practical guide*. Springer Science & Business Media.
- REIMANN, J., SEEGER, W., 1986, “Two-phase flow in a T-junction with a horizontal inlet. Part II: Pressure differences”, *International Journal of Multiphase Flow*, v. 12, n. 4, pp. 587–608.
- REIMANN, J., BRINKMANN, H. J., DOMANSKI, R., 1988, “Gas-liquid flow in dividing tee-junctions with a horizontal inlet and different branch orientations and diameters”, *Kernforschungszentrum Karlsruhe*, , n. 4399.
- REIS, E. D., 2003, *Estudo do escoamento pistonado horizontal ar-água em tubulações com ramificação “T”: School of Mechanical Engineering, State University of Campinas, 2003*. Tese de Doutorado, PhD Thesis in portuguese.
- SABA, N., LAHEY JR, R., 1982, *Phase separation phenomena in branching conduits. Topical report Dec 78-Dec 81*. Relatório técnico, Rensselaer Polytechnic Inst., Troy, NY (USA). Dept. of Nuclear Engineering.
- SABA, N., LAHEY, R. T., 1983, “The analysis of phase separation phenomena in branching conduits”, *International journal of multiphase flow*, v. 10, n. 1, pp. 1–20.
- SEEGER, W., REIMANN, J., MÜLLER, U., 1986, “Two-phase flow in a T-junction with a horizontal inlet. Part I: Phase separation”, *International journal of multiphase flow*, v. 12, n. 4, pp. 575–585.

- SHOAM, O., BRILL, J., TAITEL, Y., 1987, “Two-phase flow splitting in a tee junction-experimental and modelling”, *Chem. Eng. Sci.*, v. 42, pp. 2667–2676.
- SHOHAM, O., BRILL, J., TAITEL, Y., 1987, “Two-phase flow splitting in a tee junction—experiment and modelling”, *Chemical Engineering Science*, v. 42, n. 11, pp. 2667–2676.
- SILVA FREIRE, A. P., ILHA, A., COLAÇO, M. J., 2006, *Turbulência*. Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Ciências Mecânicas (ABCM).
- SINGH, G., GRIFFITH, P., 1970, “Determination of the pressure drop optimum pipe size for a two-phase slug flow in an inclined pipe”, *Journal of Engineering for Industry*, v. 92, n. 4, pp. 717–726.
- SOUZA, J. N., 2010, *Modelagem e Simulação de Escoamento Multifásico em Dutos de Produção de Óleo e Gás Natural*. Tese de Doutorado, Tese de M. Sc. COPPE/UFRJ–Escola de Química, Rio de Janeiro.
- SPIEGEL, M. R., SCHILLER, J. J., SRINIVASAN, R. A., 2016, *Probabilidade e Estatística-: Coleção Schaum*. Bookman Editora.
- ŠTIGLER, J., KLAS, R., KOTEK, M., et al., 2012, “The Fluid Flow in the T-Junction. The Comparison of the Numerical Modeling and Piv Measurement”, *Procedia Engineering*, v. 39, pp. 19–27.
- TAITEL, Y., DUKLER, A., 1976, “A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow”, *AIChE Journal*, v. 22, n. 1, pp. 47–55.
- VENZON, M. C. P., 1996, “Comportamento do escoamento bifásico água-ar em placas de orifício”, .
- VERMEULEN, L., RYAN, J., 1971, “Two-phase slug flow in horizontal and inclined tubes”, *The Canadian Journal of chemical engineering*, v. 49, n. 2, pp. 195–201.
- WALLIS, G., 1969, “One-Dimensional Two-Phase Flow”, *AIChE Journal*, v. 16, n. 6, pp. 896–1105.
- WHITE, F. M., CORFIELD, I., 2006, *Viscous fluid flow*, v. 3. McGraw-Hill Higher Education Boston.

- WOODS, B. D., HURLBURT, E. T., HANRATTY, T. J., 2000, "Mechanism of slug formation in downwardly inclined pipes", *International journal of multiphase flow*, v. 26, n. 6, pp. 977–998.
- WREN, E., AZZOPARDI, B., 2004, "The phase separation capabilities of two T-junctions placed in series", *Chemical Engineering Research and Design*, v. 82, n. 3, pp. 364–371.

Apêndice A

Código para o *software* MATLAB 2015a

Script para identificacao de bolhas, geração e aplicação de máscara nas imagens provenientes do *Dynamic Studios*.


```

% Script para identificacao de bolhas, geracao e aplicacao de mascara nas imagens ✓
provenientes do
% DynamicStudios

% convertendo uint16 para int16
% imagem
imInt.frame1 = cast(Input{1,1}.dataset.frame1, 'int16');
imInt.frame2 = cast(Input{1,1}.dataset.frame2, 'int16');
% fundo (imagem média)
fdInt.frame1 = cast(Input{1,2}.dataset.frame1, 'int16');
fdInt.frame2 = cast(Input{1,2}.dataset.frame2, 'int16');

% subtraindo imagem média
imSub.frame1 = imInt.frame1 - fdInt.frame1;
imSub.frame2 = imInt.frame2 - fdInt.frame2;

% ajustando o contraste
imFix.frame1 = (imSub.frame1 - min(min(imSub.frame1)))/(max(max(imSub.frame1)) - min(min(imSub.frame1))) * 4095;
imFix.frame2 = (imSub.frame2 - min(min(imSub.frame2)))/(max(max(imSub.frame2)) - min(min(imSub.frame2))) * 4095;

% delimitando regioao de interesse
imSize.frame1 = size(imFix.frame1);
imSize.frame2 = size(imFix.frame2);

% Achar os pontos com imshow((imFix.frame1 - (min(min(imFix.frame1))))/4095)
% e a ferramenta DATA CURSOR - Colocar as coordenadas X em um vetor e Y em outro
vertex_x = [730, 976, 976, 730];
vertex_y = [499, 538, 713, 674];

Mask.frame1 = poly2mask(vertex_x, vertex_y, imSize.frame1(1,1), imSize.frame1(1,2));
Mask.frame2 = poly2mask(vertex_x, vertex_y, imSize.frame2(1,1), imSize.frame2(1,2));

imMask.frame1 = imFix.frame1 * Mask.frame1 / 4095;
imMask.frame2 = imFix.frame2 * Mask.frame2 / 4095;

% aumentando contraste
imCont.frame1 = imMask.frame1 / max(max(imMask.frame1));
imCont.frame2 = imMask.frame2 / max(max(imMask.frame2));

% binarizando imagem subtraída
level1 = graythresh(imCont.frame1);
level2 = graythresh(imCont.frame2);

BW.frame1 = im2bw(imCont.frame1, 0.72) + imcomplement(Mask.frame1);
BW.frame2 = im2bw(imCont.frame2, 0.72) + imcomplement(Mask.frame2);

% aumentando tamanho das bolhas para destacar as de menor dimensao
se90 = strel('line', 3, 90);
se0 = strel('line', 3, 0);
imDest.frame1 = imerode(BW.frame1, [se90 se0]);
imDest.frame2 = imerode(BW.frame2, [se90 se0]);

```

```
% invertendo imagem
BWInv.frame1 = imcomplement(imDest.frame1);
BWInv.frame2 = imcomplement(imDest.frame2);

% preenchendo bolhas
[imP.frame1,~] = imfill(BWInv.frame1, 'holes');
[imP.frame2,~] = imfill(BWInv.frame2, 'holes');

% invertendo imagem e convertendo para uint16
imPInv.frame1 = imcomplement(imP.frame1);
imPInv.frame2 = imcomplement(imP.frame2);

% chamando variavel global de saida para o DynamicStudio
global Output;
Output.name = 'test';
Output.type = 'image'
Output.pixelDepth = 12;
Output.dataset.frame1 = uint16(4095*(imPInv.frame1));
Output.dataset.frame2 = uint16(4095*(imPInv.frame2));
```

Apêndice B

Parâmetros de Ajuste do PIV

B.1 *Software Dynamic Studio 2015a*

- Dual Power 135-15 #1:
full-name: Litron laser
use both cavities in single frame mode: enable
max trigger frequency: 15 *Hz*
- Pulse Receiver #1:
activation time: -20 μs
activation pulse time relation: First Light Pulse
activation pulse train: 7,0 μs ; 6,5 μs
activation signal polarity: Positive
Sync. with TBP: Yes
Sync. at N'th signal: 1
Sync. at N'th: 0
- Pulse Receiver #2:
activation time: -20 μs
activation pulse time relation: Second Light Pulse
activation pulse train: 9,5 μs e 7,5 μs / 8,0 μs e 6,0 μs
activation signal polarity: Positive
Sync. with TBP: Yes
Sync. at N'th signal: 1
Sync. at N'th: 0
- Speed Sense M310
perform in camera calibration: calibration is old
perform black reference calibration:
perform flat field correction: calibration is old

flat field correction: disable hot pixel correction: disable

exposure time frame 1: 500.000 μs

frame mode: use default from system control

mirroring or rotation: disable

pixel depth: 12

image area (ROI): pixels

image buffer: internal image buffer

image shift: 0 image shift

image count: 4020 images

- time between pulses: 300 a 1200 μs
- trigger rate: 15 Hz
- number of images: 4000
- double frame mode

B.2 Equipamentos

- abertura da câmera: 2.8
- Laser Power Unit:
 - repetition rate laser 1: ext trig
 - repetition rate laser 2: D/A
 - q-switch laser 1: ext trig
 - q-switch laser 2: D/A
 - repetition rate: 7.0
 - energy volts laser 1: 920
 - energy volts laser 2: 1000
 - attenuator: 990

Apêndice C

Condições Experimentais

A seguir, são apresentados as condições experimentais, juntamente com suas respectivas incertezas, para todos os ensaios realizados neste trabalho. A Tabela C.1 apresenta as condições (Ens) utilizadas nos ensaios de visualização. As Tabelas C.2 e C.3 apresentam os parâmetros obtidos nas análises de balanço mássico e de pressão.

Tabela C.1: Condições Experimentais utilizadas nos ensaios de visualização.

Ens	Q_{G1} [m ³ /h]	δQ_{G1} [m ³ /h]	P_{Tub} [bar]	δP_{Tub} [bar]	T_{Tub} [°C]	δT_{Tub} [°C]	P_{ar} [bar]	δP_{ar} [bar]	T_{ar} [°C]	δT_{ar} [°C]	Q_{L1} [m ³ /h]	δQ_{L1} [m ³ /h]	$\frac{Q_{L1}}{Q_{G1}}$	$\delta \frac{Q_{L1}}{Q_{G1}}$	u_{Gs} [m/s]	u_{Ls} [m/s]
1	0,13	±0,03	1,102	±0,011	26,95	±0,17	1,084	±0,014	25,48	±0,17	13,01	±0,26	102,2	±22,96	9,18E-03	9,39E-01
2	0,13	±0,03	1,102	±0,011	26,95	±0,17	1,084	±0,014	25,48	±0,17	13,01	±0,26	102,2	±22,96	9,18E-03	9,39E-01
3	0,13	±0,03	1,102	±0,011	26,98	±0,17	1,084	±0,014	25,5	±0,17	13,01	±0,26	102,2	±22,95	9,19E-03	9,39E-01
4	0,13	±0,03	1,102	±0,011	27,05	±0,17	1,084	±0,014	25,55	±0,17	13,01	±0,26	102,1	±22,92	9,19E-03	9,39E-01
5	0,13	±0,03	1,102	±0,011	27,11	±0,17	1,084	±0,014	26,01	±0,17	13,01	±0,26	103,8	±23,64	9,05E-03	9,39E-01
6	0,13	±0,03	1,102	±0,011	27,48	±0,17	1,084	±0,014	26,31	±0,17	13,01	±0,26	103,5	±23,55	9,07E-03	9,39E-01
7	0,13	±0,03	1,102	±0,011	27,54	±0,17	1,084	±0,014	26,46	±0,17	13,01	±0,26	103,9	±23,71	9,04E-03	9,39E-01
8	0,13	±0,03	1,102	±0,011	27,6	±0,17	1,084	±0,014	26,53	±0,17	13,01	±0,26	104	±23,73	9,03E-03	9,39E-01
9	0,13	±0,03	1,061	±0,011	27,69	±0,17	1,049	±0,014	24,99	±0,17	9,04	±0,19	67,5	±14,40	9,67E-03	6,53E-01
10	0,13	±0,03	1,059	±0,011	27,72	±0,17	1,047	±0,014	24,89	±0,17	9,04	±0,19	67,1	±14,26	9,72E-03	6,53E-01
11	0,14	±0,03	1,059	±0,011	27,76	±0,17	1,047	±0,014	24,83	±0,17	9,04	±0,19	66,9	±14,15	9,76E-03	6,53E-01
12	0,14	±0,03	1,059	±0,011	27,8	±0,17	1,047	±0,014	24,8	±0,17	9,04	±0,19	66,7	±14,08	9,78E-03	6,53E-01
13	0,14	±0,03	1,059	±0,011	27,82	±0,17	1,049	±0,014	24,82	±0,17	9,04	±0,19	66,6	±14,02	9,80E-03	6,53E-01
14	0,14	±0,03	1,013	±0,011	27,9	±0,17	1,022	±0,014	24	±0,17	6,57	±0,16	45,8	±9,14	1,04E-02	4,74E-01
15	0,14	±0,03	1,013	±0,011	27,95	±0,17	1,021	±0,014	23,9	±0,17	6,57	±0,16	45,6	±9,05	1,04E-02	4,74E-01
16	0,14	±0,03	1,014	±0,011	27,96	±0,17	1,022	±0,014	23,9	±0,17	6,57	±0,16	45,6	±9,04	1,04E-02	4,74E-01
17	0,13	±0,03	1,104	±0,011	26,45	±0,17	1,088	±0,014	25,33	±0,17	13,01	±0,26	103,4	±23,47	9,08E-03	9,39E-01
18	0,13	±0,03	1,104	±0,011	26,56	±0,17	1,088	±0,014	25,44	±0,17	13,01	±0,26	103,4	±23,48	9,08E-03	9,39E-01
19	0,13	±0,03	1,157	±0,011	27,65	±0,17	1,146	±0,014	25,13	±0,17	15,83	±0,33	118,8	±25,48	9,62E-03	1,14E+00

Tabela C.1: Condições Experimentais utilizadas nos ensaios de visualização.

Ens	Q_{G1} [m ³ /h]	δQ_{G1} [m ³ /h]	P_{Tub} [bar]	δP_{Tub} [bar]	T_{Tub} [°C]	δT_{Tub} [°C]	P_{ar} [bar]	δP_{ar} [bar]	T_{ar} [°C]	δT_{ar} [°C]	Q_{L1} [m ³ /h]	δQ_{L1} [m ³ /h]	$\frac{Q_{L1}}{Q_{G1}}$	$\delta \frac{Q_{L1}}{Q_{G1}}$	u_{Gs} [m/s]	u_{Ls} [m/s]
20	0,14	±0,03	1,157	±0,011	27,83	±0,17	1,147	±0,014	24,88	±0,17	15,83	±0,33	116,7	±24,61	9,79E-03	1,14E+00
21	0,13	±0,03	1,155	±0,011	27,99	±0,17	1,145	±0,014	25,2	±0,17	15,83	±0,33	117,6	±24,96	9,72E-03	1,14E+00
22	0,13	±0,03	1,156	±0,011	28,07	±0,17	1,146	±0,014	25,33	±0,17	15,83	±0,33	117,8	±25,08	9,70E-03	1,14E+00
23	0,13	±0,03	1,156	±0,011	28,2	±0,17	1,145	±0,014	25,41	±0,17	15,83	±0,33	117,8	±25,05	9,70E-03	1,14E+00
24	0,07	±0,03	1,075	±0,011	27,62	±0,17	1,047	±0,014	25,39	±0,17	11,65	±0,23	176,8	±79,77	4,76E-03	8,41E-01
25	0,07	±0,03	1,076	±0,011	27,71	±0,17	1,048	±0,014	25,37	±0,17	11,65	±0,23	176,1	±79,13	4,78E-03	8,41E-01
26	0,07	±0,03	1,075	±0,011	27,81	±0,17	1,048	±0,014	25,39	±0,17	11,65	±0,23	175,4	±78,54	4,80E-03	8,41E-01
27	0,14	±0,03	1,09	±0,011	27,93	±0,17	1,073	±0,014	24,7	±0,17	11,65	±0,23	85,6	±17,98	9,83E-03	8,41E-01
28	0,14	±0,03	1,089	±0,011	28,03	±0,17	1,071	±0,014	24,94	±0,17	11,65	±0,23	86,2	±18,22	9,76E-03	8,41E-01
29	0,13	±0,03	1,089	±0,011	28,12	±0,17	1,071	±0,014	25,21	±0,17	11,65	±0,23	86,9	±18,51	9,68E-03	8,41E-01
30	0,19	±0,03	1,088	±0,011	28,23	±0,17	1,078	±0,014	25,01	±0,17	11,65	±0,23	60	±8,56	1,40E-02	8,41E-01
31	0,2	±0,03	1,088	±0,011	28,29	±0,17	1,078	±0,014	24,81	±0,17	11,65	±0,23	59,4	±8,39	1,42E-02	8,41E-01
32	0,2	±0,03	1,088	±0,011	28,36	±0,17	1,078	±0,014	24,84	±0,17	11,65	±0,23	59,3	±8,37	1,42E-02	8,41E-01
33	0,27	±0,03	1,104	±0,011	28,47	±0,17	1,105	±0,014	25,04	±0,17	11,65	±0,23	42,8	±4,20	1,96E-02	8,41E-01
34	0,27	±0,03	1,105	±0,011	28,52	±0,17	1,106	±0,014	24,95	±0,17	11,65	±0,23	42,6	±4,16	1,97E-02	8,41E-01
35	0,27	±0,03	1,104	±0,011	28,57	±0,17	1,106	±0,014	25,12	±0,17	11,65	±0,23	42,8	±4,19	1,97E-02	8,41E-01

Tabela C.2: Condições experimentais utilizadas nos ensaios de balanço mássico e pressão.

Ensaio	Q_{G1} [m ³ /h]	δQ_{G1} [bar]	P_{ar} [bar]	δP_{ar} [°C]	T_{ar} [°C]	δT_{ar} [bar]	P_{Tub} [bar]	δP_{Tub} [°C]	T_{Tub} [°C]	δT_{Tub} [m ³ /h]	Q_{L1} [m ³ /h]	δQ_{L1} [m ³ /h]
1	1,87	±0,10	1,666	±0,014	22,83	±0,17	1,114	±0,011	24,35	±0,17	8,13	±0,18
2	1,92	±0,11	1,661	±0,014	22,83	±0,17	1,094	±0,011	24,41	±0,17	8,14	±0,18
3	1,87	±0,10	1,641	±0,014	23,02	±0,17	1,097	±0,011	24,61	±0,17	8,19	±0,18
4	1,85	±0,10	1,676	±0,014	21,48	±0,17	1,121	±0,011	24,31	±0,17	9,10	±0,19
5	1,86	±0,10	1,674	±0,014	22,62	±0,17	1,116	±0,011	24,87	±0,17	8,74	±0,19
6	1,80	±0,10	1,646	±0,014	20,61	±0,17	1,138	±0,011	25,07	±0,17	10,31	±0,22
7	1,78	±0,10	1,645	±0,014	21,63	±0,17	1,141	±0,011	25,11	±0,17	10,09	±0,21
8	1,80	±0,10	1,644	±0,014	20,98	±0,17	1,163	±0,011	25,39	±0,17	11,25	±0,24
9	1,79	±0,10	1,644	±0,014	22,47	±0,17	1,163	±0,011	25,51	±0,17	11,29	±0,24
10	1,76	±0,09	1,653	±0,014	22,20	±0,17	1,187	±0,011	26,39	±0,17	12,41	±0,26
11	1,75	±0,09	1,651	±0,014	23,79	±0,17	1,187	±0,011	26,49	±0,17	12,44	±0,26
12	2,41	±0,14	1,783	±0,014	22,17	±0,17	1,113	±0,011	27,16	±0,17	8,10	±0,18
13	2,39	±0,14	1,782	±0,014	24,58	±0,17	1,113	±0,011	27,21	±0,17	8,13	±0,18
14	2,42	±0,14	1,782	±0,014	24,65	±0,17	1,106	±0,011	27,25	±0,17	8,11	±0,18
15	2,55	±0,15	1,899	±0,014	23,51	±0,17	1,118	±0,011	27,33	±0,17	9,03	±0,19
16	2,56	±0,15	1,898	±0,014	24,20	±0,17	1,114	±0,011	27,38	±0,17	9,07	±0,19
17	2,62	±0,15	1,876	±0,014	22,65	±0,17	1,141	±0,011	26,32	±0,17	10,20	±0,22
18	2,62	±0,15	1,873	±0,014	22,93	±0,17	1,138	±0,011	26,38	±0,17	9,94	±0,21
19	2,62	±0,15	1,871	±0,014	22,99	±0,17	1,138	±0,011	26,44	±0,17	10,23	±0,22

Tabela C.2: Condições experimentais utilizadas nos ensaios de balanço mássico e pressão.

Ensaio	Q_{G1} [m ³ /h]	δQ_{G1} [bar]	P_{ar} [bar]	δP_{ar} [°C]	T_{ar} [°C]	δT_{ar} [bar]	P_{Tub} [bar]	δP_{Tub} [°C]	T_{Tub} [°C]	δT_{Tub} [m ³ /h]	Q_{L1} [m ³ /h]	δQ_{L1} [m ³ /h]
20	2,60	±0,15	1,897	±0,014	22,68	±0,17	1,160	±0,011	26,65	±0,17	11,19	±0,24
21	2,58	±0,15	1,879	±0,014	22,65	±0,17	1,160	±0,011	26,86	±0,17	11,18	±0,24
22	2,52	±0,14	1,877	±0,014	26,92	±0,17	1,162	±0,011	24,50	±0,17	11,18	±0,24
23	3,23	±0,20	2,071	±0,014	23,31	±0,17	1,110	±0,011	27,45	±0,17	8,23	±0,18
24	3,76	±0,21	1,693	±0,014	23,79	±0,17	1,111	±0,011	27,49	±0,17	8,09	±0,18
25	3,74	±0,21	1,662	±0,014	23,74	±0,17	1,094	±0,011	27,50	±0,17	8,13	±0,18
26	3,74	±0,21	1,660	±0,014	23,76	±0,17	1,093	±0,011	27,54	±0,17	8,19	±0,18
27	1,71	±0,09	1,626	±0,014	22,69	±0,17	1,196	±0,011	27,72	±0,17	14,06	±0,31
28	1,74	±0,09	1,626	±0,014	22,69	±0,17	1,195	±0,011	27,89	±0,17	13,93	±0,30
29	2,50	±0,13	1,684	±0,014	22,18	±0,17	1,173	±0,011	24,80	±0,17	12,28	±0,26
30	2,52	±0,14	1,684	±0,014	22,86	±0,17	1,173	±0,011	28,10	±0,17	12,12	±0,26
31	3,31	±0,19	1,736	±0,014	22,66	±0,17	1,115	±0,011	28,14	±0,17	9,01	±0,19
32	3,31	±0,19	1,736	±0,014	23,47	±0,17	1,115	±0,011	28,16	±0,17	9,02	±0,19
33	4,89	±0,28	1,796	±0,014	22,87	±0,17	1,136	±0,011	28,25	±0,17	9,92	±0,21
34	3,44	±0,20	1,796	±0,014	23,60	±0,17	1,137	±0,011	28,28	±0,17	9,92	±0,21
35	3,44	±0,19	1,796	±0,014	23,76	±0,17	1,137	±0,011	28,31	±0,17	10,01	±0,21
36	3,33	±0,19	1,793	±0,014	22,67	±0,17	1,153	±0,011	28,41	±0,17	11,15	±0,24
37	3,32	±0,19	1,791	±0,014	23,81	±0,17	1,153	±0,011	28,45	±0,17	11,14	±0,23
38	3,27	±0,18	1,763	±0,014	23,16	±0,17	1,163	±0,011	28,56	±0,17	12,36	±0,26

Tabela C.2: Condições experimentais utilizadas nos ensaios de balanço mássico e pressão.

Ensaio	Q_{G1} [m ³ /h]	δQ_{G1} [bar]	P_{ar} [bar]	δP_{ar} [°C]	T_{ar} [°C]	δT_{ar} [bar]	P_{Tub} [bar]	δP_{Tub} [°C]	T_{Tub} [°C]	δT_{Tub} [m ³ /h]	Q_{L1} [m ³ /h]	δQ_{L1} [m ³ /h]
39	3,42	±0,19	1,807	±0,014	23,59	±0,17	1,162	±0,011	28,62	±0,17	12,48	±0,27
40	3,41	±0,19	1,806	±0,014	24,06	±0,17	1,162	±0,011	28,67	±0,17	12,30	±0,26
41	2,50	±0,14	1,709	±0,014	22,41	±0,17	1,180	±0,011	28,70	±0,17	13,68	±0,30
42	2,58	±0,14	1,738	±0,014	23,59	±0,17	1,178	±0,011	28,79	±0,17	13,65	±0,29
43	3,46	±0,20	1,828	±0,014	23,46	±0,17	1,169	±0,011	28,93	±0,17	13,63	±0,29
44	3,44	±0,19	1,826	±0,014	24,39	±0,17	1,169	±0,011	29,00	±0,17	13,68	±0,30
45	3,31	±0,18	1,672	±0,014	24,44	±0,17	1,094	±0,011	29,03	±0,17	8,11	±0,18
46	4,48	±0,25	1,767	±0,014	24,98	±0,17	1,100	±0,011	29,06	±0,17	8,09	±0,18
47	4,44	±0,25	1,770	±0,014	24,98	±0,17	1,109	±0,011	29,07	±0,17	8,09	±0,18
48	4,43	±0,25	1,774	±0,014	25,27	±0,17	1,113	±0,011	29,19	±0,17	9,01	±0,19
49	4,38	±0,25	1,775	±0,014	25,36	±0,17	1,121	±0,011	29,22	±0,17	9,03	±0,19
50	4,46	±0,25	1,780	±0,014	25,41	±0,17	1,112	±0,011	29,24	±0,17	9,04	±0,19
51	4,41	±0,25	1,783	±0,014	24,71	±0,17	1,132	±0,011	29,29	±0,17	10,14	±0,21
52	4,40	±0,25	1,781	±0,014	25,35	±0,17	1,132	±0,011	29,32	±0,17	9,89	±0,21
53	4,43	±0,25	1,803	±0,014	24,84	±0,17	1,142	±0,011	29,42	±0,17	11,26	±0,24
54	4,42	±0,25	1,803	±0,014	25,57	±0,17	1,142	±0,011	29,44	±0,17	11,14	±0,23
55	4,41	±0,25	1,803	±0,014	25,12	±0,17	1,153	±0,011	29,53	±0,17	12,32	±0,26
56	4,40	±0,25	1,803	±0,014	25,74	±0,17	1,153	±0,011	29,58	±0,17	12,38	±0,26
57	4,04	±0,23	1,837	±0,014	25,20	±0,17	1,154	±0,011	29,68	±0,17	13,66	±0,29

Tabela C.2: Condições experimentais utilizadas nos ensaios de balanço mássico e pressão.

Ensaio	Q_{G1} [m ³ /h]	δQ_{G1} [bar]	P_{ar} [bar]	δP_{ar} [°C]	T_{ar} [°C]	δT_{ar} [bar]	P_{Tub} [bar]	δP_{Tub} [°C]	T_{Tub} [°C]	δT_{Tub} [m ³ /h]	Q_{L1} [m ³ /h]	δQ_{L1} [m ³ /h]
58	4,03	±0,23	1,836	±0,014	25,77	±0,17	1,155	±0,011	29,74	±0,17	13,68	±0,30
59	4,86	±0,29	1,888	±0,014	23,29	±0,17	1,111	±0,011	27,57	±0,17	9,04	±0,09
60	4,83	±0,29	1,890	±0,014	23,33	±0,17	1,117	±0,011	27,61	±0,17	9,03	±0,19
61	4,86	±0,29	1,887	±0,014	23,37	±0,17	1,110	±0,011	27,65	±0,17	9,06	±0,19
62	4,51	±0,26	1,834	±0,014	22,97	±0,17	1,126	±0,011	27,77	±0,17	10,17	±0,21
63	4,66	±0,27	1,872	±0,014	23,53	±0,17	1,128	±0,011	27,81	±0,17	10,12	±0,21
64	6,15	±0,36	1,902	±0,014	23,58	±0,17	1,129	±0,011	27,84	±0,17	10,15	±0,21
65	4,81	±0,28	1,900	±0,014	23,55	±0,17	1,126	±0,011	27,87	±0,17	10,05	±0,21
66	4,74	±0,28	1,907	±0,014	23,63	±0,17	1,138	±0,011	28,08	±0,17	11,21	±0,24
67	4,73	±0,28	1,905	±0,014	23,73	±0,17	1,139	±0,011	28,12	±0,17	11,23	±0,24
68	4,84	±0,29	1,951	±0,014	23,88	±0,17	1,147	±0,011	28,31	±0,17	12,33	±0,26
69	4,84	±0,29	1,953	±0,014	23,98	±0,17	1,148	±0,011	28,37	±0,17	12,38	±0,26
70	4,72	±0,28	1,936	±0,014	24,02	±0,17	1,156	±0,011	28,77	±0,17	13,66	±0,29
71	4,71	±0,28	1,935	±0,014	24,22	±0,17	1,157	±0,011	28,84	±0,17	13,45	±0,29
72	6,00	±0,35	1,875	±0,014	24,30	±0,17	1,152	±0,011	28,96	±0,17	13,55	±0,29
73	6,00	±0,35	1,875	±0,014	24,31	±0,17	1,152	±0,011	29,02	±0,17	13,65	±0,29
74	7,63	±0,47	2,040	±0,014	24,36	±0,17	1,149	±0,011	29,13	±0,17	13,66	±0,29
75	7,64	±0,47	2,041	±0,014	24,38	±0,17	1,149	±0,011	29,20	±0,17	13,65	±0,29
76	7,41	±0,45	1,977	±0,014	24,72	±0,17	1,140	±0,011	29,49	±0,17	12,36	±0,26

Tabela C.2: Condições experimentais utilizadas nos ensaios de balanço mássico e pressão.

Ensaio	Q_{G1} [m ³ /h]	δQ_{G1} [bar]	P_{ar} [bar]	δP_{ar} [°C]	T_{ar} [°C]	δT_{ar} [bar]	P_{Tub} [bar]	δP_{Tub} [°C]	T_{Tub} [°C]	δT_{Tub} [m ³ /h]	Q_{L1} [m ³ /h]	δQ_{L1} [m ³ /h]
77	7,40	±0,44	1,974	±0,014	24,82	±0,17	1,140	±0,011	29,54	±0,17	12,35	±0,26
78	1,35	±0,06	1,096	±0,014	23,94	±0,17	1,085	±0,011	29,80	±0,17	15,25	±0,34
79	1,92	±0,10	1,714	±0,014	24,12	±0,17	1,187	±0,011	29,90	±0,17	15,15	±0,33
80	1,74	±0,08	1,096	±0,014	24,25	±0,17	1,085	±0,011	29,97	±0,17	15,27	±0,34

Tabela C.3: Dados obtidos para os trechos 2 e 3 nos ensaios de balanço mássico e pressão.

Ensaio	Q_{G3} [m^3/h]	δQ_{G3} [m^3/h]	P_{G3} [bar]	δP_{G3} [bar]	T_{G3} [$^{\circ}C$]	δT_{G3} [$^{\circ}C$]	Q_{L3} [m^3/h]	δQ_{L3} [m^3/h]	ρ_2 [kg/L]	$\delta \rho_2$ [kg/L]	T_{tub} [$^{\circ}C$]	δT_{tub} [$^{\circ}C$]	$P05$ [bar]	$\delta P05$ [bar]
1	1,27	$\pm 0,10$	1,040	$\pm 0,003$	23,25	$\pm 0,17$	-	-	0,907	$\pm 0,001$	24,35	$\pm 0,17$	1,019	$\pm 0,011$
2	1,30	$\pm 0,10$	1,039	$\pm 0,003$	23,30	$\pm 0,17$	-	-	0,907	$\pm 0,001$	24,41	$\pm 0,17$	1,018	$\pm 0,011$
3	1,27	$\pm 0,10$	1,039	$\pm 0,003$	23,35	$\pm 0,17$	-	-	0,902	$\pm 0,001$	24,61	$\pm 0,17$	1,030	$\pm 0,011$
4	1,14	$\pm 0,10$	1,039	$\pm 0,003$	23,44	$\pm 0,17$	-	-	0,916	$\pm 0,001$	24,31	$\pm 0,17$	1,044	$\pm 0,011$
5	1,16	$\pm 0,10$	1,039	$\pm 0,003$	23,47	$\pm 0,17$	-	-	0,909	$\pm 0,001$	24,87	$\pm 0,17$	1,035	$\pm 0,011$
6	0,99	$\pm 0,09$	1,039	$\pm 0,003$	23,54	$\pm 0,17$	-	-	0,909	$\pm 0,001$	25,07	$\pm 0,17$	1,060	$\pm 0,011$
7	0,99	$\pm 0,09$	1,039	$\pm 0,003$	23,55	$\pm 0,17$	-	-	0,902	$\pm 0,001$	25,11	$\pm 0,17$	1,057	$\pm 0,011$
8	0,98	$\pm 0,09$	1,038	$\pm 0,003$	23,74	$\pm 0,17$	-	-	0,871	$\pm 0,001$	25,39	$\pm 0,17$	1,089	$\pm 0,011$
9	0,98	$\pm 0,09$	1,038	$\pm 0,003$	23,83	$\pm 0,17$	-	-	0,871	$\pm 0,001$	25,51	$\pm 0,17$	1,084	$\pm 0,011$
10	0,95	$\pm 0,09$	1,036	$\pm 0,003$	24,32	$\pm 0,17$	0,14	$\pm 0,02$	0,877	$\pm 0,001$	26,39	$\pm 0,17$	1,118	$\pm 0,011$
11	0,94	$\pm 0,09$	1,037	$\pm 0,003$	24,34	$\pm 0,17$	0,14	$\pm 0,02$	0,873	$\pm 0,001$	26,49	$\pm 0,17$	1,117	$\pm 0,011$
12	1,72	$\pm 0,10$	1,025	$\pm 0,003$	24,32	$\pm 0,17$	-	-	0,903	$\pm 0,001$	27,16	$\pm 0,17$	1,023	$\pm 0,011$
13	1,72	$\pm 0,10$	1,024	$\pm 0,003$	24,41	$\pm 0,17$	-	-	0,906	$\pm 0,001$	27,21	$\pm 0,17$	1,023	$\pm 0,011$
14	1,74	$\pm 0,10$	1,024	$\pm 0,003$	24,43	$\pm 0,17$	-	-	0,910	$\pm 0,001$	27,25	$\pm 0,17$	1,018	$\pm 0,011$
15	1,79	$\pm 0,10$	1,023	$\pm 0,003$	24,39	$\pm 0,17$	-	-	0,902	$\pm 0,001$	27,33	$\pm 0,17$	1,032	$\pm 0,011$
16	1,80	$\pm 0,10$	1,023	$\pm 0,003$	24,40	$\pm 0,17$	-	-	0,913	$\pm 0,001$	27,38	$\pm 0,17$	1,032	$\pm 0,011$
17	1,80	$\pm 0,10$	1,025	$\pm 0,003$	23,59	$\pm 0,17$	-	-	0,904	$\pm 0,001$	26,32	$\pm 0,17$	1,056	$\pm 0,011$
18	1,80	$\pm 0,10$	1,025	$\pm 0,003$	23,66	$\pm 0,17$	-	-	0,904	$\pm 0,001$	26,38	$\pm 0,17$	1,056	$\pm 0,011$
19	1,78	$\pm 0,10$	1,024	$\pm 0,003$	23,73	$\pm 0,17$	-	-	0,909	$\pm 0,001$	26,44	$\pm 0,17$	1,056	$\pm 0,011$

Tabela C.3: Dados obtidos para os trechos 2 e 3 nos ensaios de balanço mássico e pressão.

Ensaio	Q_{G3} [m^3/h]	δQ_{G3} [m^3/h]	P_{G3} [bar]	δP_{G3} [bar]	T_{G3} [$^{\circ}C$]	δT_{G3} [$^{\circ}C$]	Q_{L3} [m^3/h]	δQ_{L3} [m^3/h]	ρ_2 [kg/L]	$\delta \rho_2$ [kg/L]	T_{tub} [$^{\circ}C$]	δT_{tub} [$^{\circ}C$]	$P05$ [bar]	$\delta P05$ [bar]
20	1,67	$\pm 0,09$	1,024	$\pm 0,003$	23,88	$\pm 0,17$	0,14	$\pm 0,01$	0,867	$\pm 0,001$	26,65	$\pm 0,17$	1,082	$\pm 0,011$
21	1,67	$\pm 0,09$	1,024	$\pm 0,003$	24,16	$\pm 0,17$	0,09	$\pm 0,02$	0,866	$\pm 0,001$	26,86	$\pm 0,17$	1,081	$\pm 0,011$
22	1,65	$\pm 0,09$	1,024	$\pm 0,003$	24,30	$\pm 0,17$	0,09	$\pm 0,02$	0,865	$\pm 0,001$	24,50	$\pm 0,17$	1,078	$\pm 0,011$
23	2,52	$\pm 0,10$	1,028	$\pm 0,003$	24,38	$\pm 0,17$	-	-	0,902	$\pm 0,001$	27,45	$\pm 0,17$	1,031	$\pm 0,011$
24	3,03	$\pm 0,10$	1,030	$\pm 0,003$	24,56	$\pm 0,17$	-	-	0,908	$\pm 0,001$	27,49	$\pm 0,17$	1,036	$\pm 0,011$
25	3,00	$\pm 0,10$	1,030	$\pm 0,003$	24,61	$\pm 0,17$	-	-	0,906	$\pm 0,001$	27,50	$\pm 0,17$	1,029	$\pm 0,011$
26	3,17	$\pm 0,10$	1,085	$\pm 0,003$	24,68	$\pm 0,17$	-	-	0,914	$\pm 0,001$	27,54	$\pm 0,17$	1,031	$\pm 0,011$
27	0,96	$\pm 0,09$	1,035	$\pm 0,003$	24,37	$\pm 0,17$	0,67	$\pm 0,02$	0,891	$\pm 0,001$	27,72	$\pm 0,17$	1,130	$\pm 0,011$
28	0,98	$\pm 0,09$	1,035	$\pm 0,003$	24,42	$\pm 0,17$	0,68	$\pm 0,02$	0,884	$\pm 0,001$	27,89	$\pm 0,17$	1,131	$\pm 0,011$
29	1,68	$\pm 0,09$	1,035	$\pm 0,003$	24,60	$\pm 0,17$	0,57	$\pm 0,01$	0,881	$\pm 0,001$	24,80	$\pm 0,17$	1,106	$\pm 0,011$
30	1,70	$\pm 0,09$	1,035	$\pm 0,003$	24,72	$\pm 0,17$	0,56	$\pm 0,02$	0,883	$\pm 0,001$	28,10	$\pm 0,17$	1,106	$\pm 0,011$
31	2,47	$\pm 0,10$	1,035	$\pm 0,003$	24,81	$\pm 0,17$	-	-	0,915	$\pm 0,001$	28,14	$\pm 0,17$	1,036	$\pm 0,011$
32	2,54	$\pm 0,10$	1,065	$\pm 0,003$	24,85	$\pm 0,17$	-	-	0,919	$\pm 0,001$	28,16	$\pm 0,17$	1,043	$\pm 0,011$
33	2,59	$\pm 0,10$	1,067	$\pm 0,003$	24,89	$\pm 0,17$	0,16	$\pm 0,02$	0,902	$\pm 0,001$	28,25	$\pm 0,17$	1,053	$\pm 0,011$
34	2,60	$\pm 0,10$	1,067	$\pm 0,003$	24,94	$\pm 0,17$	0,01	$\pm 0,02$	0,904	$\pm 0,001$	28,28	$\pm 0,17$	1,063	$\pm 0,011$
35	2,59	$\pm 0,10$	1,061	$\pm 0,003$	24,96	$\pm 0,17$	0,13	$\pm 0,02$	0,911	$\pm 0,001$	28,31	$\pm 0,17$	1,063	$\pm 0,011$
36	2,54	$\pm 0,10$	1,060	$\pm 0,003$	24,93	$\pm 0,17$	0,31	$\pm 0,02$	0,871	$\pm 0,001$	28,41	$\pm 0,17$	1,078	$\pm 0,011$
37	2,40	$\pm 0,10$	1,061	$\pm 0,003$	25,01	$\pm 0,17$	0,31	$\pm 0,02$	0,868	$\pm 0,001$	28,45	$\pm 0,17$	1,079	$\pm 0,011$
38	2,53	$\pm 0,10$	1,086	$\pm 0,003$	25,14	$\pm 0,17$	0,79	$\pm 0,02$	0,874	$\pm 0,001$	28,56	$\pm 0,17$	1,095	$\pm 0,011$

Tabela C.3: Dados obtidos para os trechos 2 e 3 nos ensaios de balanço mássico e pressão.

Ensaio	Q_{G3} [m ³ /h]	δQ_{G3} [m ³ /h]	P_{G3} [bar]	δP_{G3} [bar]	T_{G3} [°C]	δT_{G3} [°C]	Q_{L3} [m ³ /h]	δQ_{L3} [m ³ /h]	ρ_2 [kg/L]	$\delta \rho_2$ [kg/L]	T_{tub} [°C]	δT_{tub} [°C]	$P05$ [bar]	$\delta P05$ [bar]
39	2,52	±0,10	1,041	±0,003	25,22	±0,17	0,88	±0,02	0,874	±0,001	28,62	±0,17	1,093	±0,011
40	2,48	±0,10	1,022	±0,003	25,29	±0,17	0,88	±0,02	0,873	±0,001	28,67	±0,17	1,093	±0,011
41	1,83	±0,10	1,066	±0,003	24,18	±0,17	1,08	±0,02	0,895	±0,001	28,70	±0,17	1,116	±0,011
42	1,94	±0,10	1,066	±0,003	24,75	±0,17	1,11	±0,02	0,893	±0,001	28,79	±0,17	1,110	±0,011
43	2,74	±0,10	1,046	±0,003	25,15	±0,17	1,41	±0,03	0,898	±0,001	28,93	±0,17	1,099	±0,011
44	2,74	±0,10	1,046	±0,003	25,47	±0,17	1,42	±0,03	0,902	±0,001	29,00	±0,17	1,098	±0,011
45	2,66	±0,10	1,065	±0,003	25,60	±0,17	-	-	0,911	±0,001	29,03	±0,17	1,030	±0,011
46	3,85	±0,10	1,065	±0,003	25,78	±0,17	-	-	0,919	±0,001	29,06	±0,17	1,026	±0,011
47	3,81	±0,10	1,065	±0,003	25,88	±0,17	-	-	0,904	±0,001	29,07	±0,17	1,023	±0,011
48	3,62	±0,10	1,035	±0,003	26,10	±0,17	-	-	0,909	±0,001	29,19	±0,17	1,036	±0,011
49	3,68	±0,10	1,055	±0,003	26,16	±0,17	0,06	±0,02	0,916	±0,001	29,22	±0,17	1,036	±0,011
50	3,74	±0,10	1,056	±0,003	26,21	±0,17	-	-	0,914	±0,001	29,24	±0,17	1,038	±0,011
51	3,66	±0,10	1,066	±0,003	26,17	±0,17	0,12	±0,02	0,910	±0,001	29,29	±0,17	1,050	±0,011
52	3,65	±0,10	1,066	±0,003	26,26	±0,17	0,12	±0,02	0,907	±0,001	29,32	±0,17	1,054	±0,011
53	3,58	±0,10	1,044	±0,003	26,30	±0,17	0,55	±0,02	0,876	±0,001	29,42	±0,17	1,067	±0,011
54	3,59	±0,10	1,044	±0,003	26,46	±0,17	0,55	±0,02	0,874	±0,001	29,44	±0,17	1,067	±0,011
55	3,68	±0,10	1,063	±0,003	26,42	±0,17	1,06	±0,02	0,873	±0,001	29,53	±0,17	1,077	±0,011
56	3,66	±0,10	1,063	±0,003	26,59	±0,17	1,05	±0,02	0,875	±0,001	29,58	±0,17	1,077	±0,011
57	3,81	±0,10	1,063	±0,003	25,98	±0,17	1,77	±0,03	0,887	±0,001	29,68	±0,17	1,084	±0,011

Tabela C.3: Dados obtidos para os trechos 2 e 3 nos ensaios de balanço mássico e pressão.

Ensaio	Q_{G3} [m ³ /h]	δQ_{G3} [m ³ /h]	P_{G3} [bar]	δP_{G3} [bar]	T_{G3} [°C]	δT_{G3} [°C]	Q_{L3} [m ³ /h]	δQ_{L3} [m ³ /h]	ρ_2 [kg/L]	$\delta \rho_2$ [kg/L]	T_{tub} [°C]	δT_{tub} [°C]	$P05$ [bar]	$\delta P05$ [bar]
58	3,72	±0,10	1,033	±0,003	26,17	±0,17	1,76	±0,03	0,890	±0,001	29,74	±0,17	1,084	±0,011
59	4,44	±0,10	1,033	±0,003	24,26	±0,17	0,03	±0,02	0,911	±0,001	27,57	±0,17	1,041	±0,011
60	4,48	±0,11	1,053	±0,003	24,60	±0,17	0,21	±0,02	0,919	±0,001	27,61	±0,17	1,047	±0,011
61	4,49	±0,11	1,054	±0,003	24,92	±0,17	0,03	±0,02	0,917	±0,001	27,65	±0,17	1,041	±0,011
62	4,12	±0,11	1,064	±0,003	25,22	±0,17	0,36	±0,02	0,912	±0,001	27,77	±0,17	1,062	±0,011
63	4,31	±0,11	1,064	±0,003	25,32	±0,17	0,48	±0,02	0,908	±0,001	27,81	±0,17	1,058	±0,011
64	4,35	±0,12	1,044	±0,003	25,41	±0,17	0,60	±0,02	0,912	±0,001	27,84	±0,17	1,044	±0,011
65	4,37	±0,13	1,044	±0,003	25,48	±0,17	0,40	±0,02	0,914	±0,001	27,87	±0,17	1,058	±0,011
66	4,40	±0,14	1,066	±0,003	25,42	±0,17	0,83	±0,02	0,886	±0,001	28,08	±0,17	1,072	±0,011
67	4,37	±0,15	1,066	±0,003	25,62	±0,17	0,85	±0,02	0,881	±0,001	28,12	±0,17	1,072	±0,011
68	4,49	±0,16	1,066	±0,003	25,31	±0,17	1,45	±0,03	0,880	±0,001	28,31	±0,17	1,077	±0,011
69	4,39	±0,17	1,036	±0,003	25,72	±0,17	1,41	±0,03	0,885	±0,001	28,37	±0,17	1,077	±0,011
70	4,30	±0,18	1,036	±0,003	25,69	±0,17	1,93	±0,03	0,891	±0,001	28,77	±0,17	1,089	±0,011
71	4,44	±0,19	1,056	±0,003	26,05	±0,17	1,89	±0,03	0,891	±0,001	28,84	±0,17	1,089	±0,011
72	5,53	±0,11	1,057	±0,003	26,35	±0,17	2,06	±0,03	0,890	±0,001	28,96	±0,17	1,094	±0,011
73	5,65	±0,11	1,067	±0,003	26,58	±0,17	1,99	±0,03	0,891	±0,001	29,02	±0,17	1,094	±0,011
74	7,16	±0,12	1,067	±0,003	26,28	±0,17	2,16	±0,03	0,889	±0,001	29,13	±0,17	1,075	±0,011
75	7,03	±0,12	1,047	±0,003	26,44	±0,17	2,16	±0,03	0,886	±0,001	29,20	±0,17	1,075	±0,011
76	6,70	±0,12	1,047	±0,003	24,88	±0,17	1,64	±0,03	0,884	±0,001	29,49	±0,17	1,064	±0,011

Tabela C.3: Dados obtidos para os trechos 2 e 3 nos ensaios de balanço mássico e pressão.

Ensaio	Q_{G3} [m ³ /h]	δQ_{G3} [m ³ /h]	P_{G3} [bar]	δP_{G3} [bar]	T_{G3} [°C]	δT_{G3} [°C]	Q_{L3} [m ³ /h]	δQ_{L3} [m ³ /h]	ρ_2 [kg/L]	$\delta \rho_2$ [kg/L]	T_{tub} [°C]	δT_{tub} [°C]	P_{05} [bar]	δP_{05} [bar]
77	6,86	±0,12	1,066	±0,003	26,40	±0,17	1,65	±0,03	0,882	±0,001	29,54	±0,17	1,064	±0,011
78	2,15	±0,10	1,066	±0,003	26,41	±0,17	1,73	±0,03	0,908	±0,001	29,80	±0,17	1,120	±0,011
79	1,93	±0,09	1,066	±0,003	26,40	±0,17	1,75	±0,03	0,911	±0,001	29,90	±0,17	1,127	±0,011
80	2,10	±0,10	1,036	±0,003	26,38	±0,17	1,69	±0,03	0,910	±0,001	29,97	±0,17	1,109	±0,011